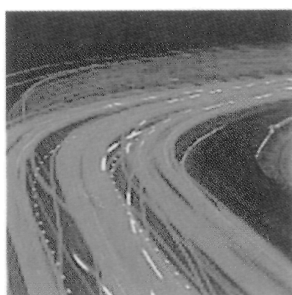


С В Я З И

Р. ФРИМАН

Волоконно-
оптические
системы связи



ТЕХНОСФЕРА



М **И** **Р**
С **В** **Я** **З** **И**

Р. ФРИМАН

**Волоконно-
оптические
СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

Перевод с английского
под редакцией Н.Н. Слепова

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2003

Содержание

Предисловие к русскому изданию

Предисловие автора

Глава 1 Введение в передачу сигнала по оптическому волокну

- 1.1. Требования к полосе пропускания
- 1.2. Модель волоконно-оптической системы передачи
 - 1.2.1. Диапазоны длин волн, используемые для передачи сигнала по оптоволокну
- 1.3. Волоконно-оптический световод как среда передачи
 - 1.3.1. Конструкция световода
 - 1.3.2. Как свет распространяется по волоконно-оптическому световоду

Глава 2 Волоконно-оптический кабель

- 2.1. Типы оптических волокон
 - 2.1.1. Определение диаметра сердцевины
 - 2.1.2. Три типа оптических волокон
- 2.2. Распространение различных мод по оптоволокну
- 2.3. Микроизгибы и макроизгибы
- 2.4. Конструкция кабеля
 - 2.4.1. Диаметр оптоволокну
 - 2.4.2. Плотное буферное покрытие или свободная буферная трубка
 - 2.4.3. Силовые элементы
- 2.5. Характеристики оптического волокна
 - 2.5.1. Оптические характеристики
 - 2.5.2. Механические характеристики
 - 2.5.3. Волоконно-оптические модули

- 2.6. Волокно с выровненным или с профильным показателем преломления оболочки
- 2.7. Типичные характеристики оптического волокна высокого качества

Глава 3 Оптические разъемы, сростки и пассивные оптические устройства

- 3.1. Введение
- 3.2. Основные определения
 - 3.2.1. Элемент, ответвляющий поток (неселективный по отношению к длине волны)
 - 3.2.2. Оптический разветвитель (сплиттер — комбайнер)
 - 3.2.3. Атенюатор
 - 3.2.4. Волоконно-оптический фильтр
 - 3.2.5. Волоконно-оптический изолятор
 - 3.2.6. Волоконно-оптический терминатор
 - 3.2.7. Волоконно-оптический переключатель (коммутатор)
 - 3.2.8. Пассивный компенсатор (хроматической) дисперсии
 - 3.2.9. Волоконно-оптический соединитель (оптический разъем)
 - 3.2.10. Сращивание оптических волокон
- 3.3. Определение функциональных параметров (За основу взят стандарт ITU-TG.671, Раздел 3.2)
 - 3.3.1. Вносимые потери (IL)
 - 3.3.2. Возвратные потери (RL)
 - 3.3.3. Отражательная способность
 - 3.3.4. Предварительное обсуждение направленности, возвратных потерь и отражательной способности
 - 3.3.5. Рабочий диапазон длин волн
 - 3.3.6. Потери, зависящие от поляризации (PDL)
 - 3.3.7. Зависимость отражательной способности от поляризации
 - 3.3.8. Обратные потери (степень изоляции) волоконно

оптических изоляторов

3.3.9. Направленность

3.3.10. Однородность

3.3.11. Оптический порт

3.3.12. Матрица передачи волоконно-оптических устройств
ветвления и WDM-устройств

3.3.13. Коэффициент передачи волоконно-оптических устройств
ветвления и WDM-устройств

3.3.14. Логарифмический коэффициент матрицы передачи
волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств

3.3.15. Матрица передачи волоконно-оптических коммутаторов

3.3.16. Коэффициенты передачи волоконно-оптических
коммутаторов

3.3.17. Логарифмическая матрица передачи волоконно
оптических коммутаторов

3.3.18. Избыточные потери волоконно-оптических устройств
ветвления

3.3.19. Коэффициент связи

3.3.20. Рабочая длина волны

3.3.21. Матрица времен переключений волоконно-оптического
коммутатора

3.4. Оптические разъемы и неразъемное соединение (сращивание)
волокон

3.4.1. Оптические разъемы

3.4.2. Неразъемное соединение волокон

3.5. Волоконно-оптические элементы ветвления потока, или
разветвители

3.5.1. Введение

3.5.2. Концепции разветвителей/элементов ветвления

3.5.3. Рабочие параметры разветвителей/элементов ветвления

- 3.5.4. Основные определения разветвителей/элементов ветвления
- 3.5.5. Звездообразные и направленные разветвители/элементы ветвления — дополнительное обсуждение
- 3.6. Оптические аттенюаторы
 - 3.6.1. Основные рабочие параметры аттенюаторов
- 3.7. Изоляторы
- 3.8. Волоконно-оптические фильтры
- 3.9. Оптические кроссы, коммутационные панели и оптические коммутаторы

Глава 4 Источники света

- 4.1. Введение
- 4.2. Светоизлучающие диоды
- 4.3. Лазерные диоды
 - 4.3.1. Многомодовые (ММ) лазеры, или лазеры с резонаторами Фабри—Перо
 - 4.3.2. Одномодовые (SLM) лазеры
 - 4.3.3. Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (DFB)
 - 4.3.4. DFB-лазеры с внешним модулятором
 - 4.3.5. Лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL)
- 4.4. Частотно-модулированный импульс (чирп)
 - 4.4.1. Понятие ЧМ импульса
 - 4.4.2. Подробное обсуждение ЧМ сдвига
 - 4.4.3. Параметры импульсов, характеризующие эффект ЧМ сдвига
- 4.5. Потери мощности
- 4.6. Основные параметры промышленных источников светового излучения

- 4.6.1. Светоизлучающие диоды (СИД)
- 4.6.2. Лазерные диоды (ЛД)
- 4.6.3. Сравнение характеристик СИД с характеристиками некоторых типов лазерных диодов
- 4.6.4. Рабочие характеристики некоторых промышленных лазерных диодов
- 4.7. Настраиваемые лазеры
 - 4.7.1. Настраиваемый DFB-лазер
 - 4.7.2. Лазер с распределенным брэгговским отражателем (DBR)
 - 4.7.3. DBR-лазеры с выбранными решетками (SG-DBR)
 - 4.7.4. VCSEL-лазеры
 - 4.7.5. Лазеры с внешней резонаторной полостью
- 4.8. Модулированные импульсные последовательности

Глава 5 Детекторы светового излучения

- 5.1. Введение
- 5.2. Определения
- 5.3. Необходимые соотношения
- 5.4. PIN-фотодиоды
 - 5.4.1. Конструкция детектора на основе кремниевого фотодиода
 - 5.4.2. Обзор фотодиодных детекторов на основе InGaAs
 - 5.4.3. Лавинные фотодиоды (APD)
 - 5.4.4. Применение APD
- 5.5. Оптические приемники
 - 5.5.1. Электрические усилители, выход приемника
 - 5.5.2. Глазковая диаграмма
 - 5.5.3. Уровень принятого сигнала и BER
- 5.6. Замечания по применению детекторов

Глава 6 Ухудшение передачи света

- 6.1. Введение
- 6.2. Потери или ослабление сигнала в оптическом волокне
 - 6.2.1. Собственные внутренние потери
 - 6.2.2. Потери от наличия примеси (внешние потери поглощения)
 - 6.2.3. Рэлеевское рассеяние
 - 6.2.4. Несовершенство оптического волокна (ОВ)
- 6.3. Дисперсия
 - 6.3.1. Межмодовая дисперсия
 - 6.3.2. Материальная дисперсия
 - 6.3.3. Хроматическая дисперсия
 - 6.3.4. Поляризационная модовая дисперсия (PMD)
 - 6.3.5. Компенсация дисперсии
- 6.4. Нелинейные эффекты
 - 6.4.1. Введение в оптические нелинейности
 - 6.4.2. Вынужденное рассеяние Бриллюэна
 - 6.4.3. Вынужденное рассеяние Рамана
 - 6.4.4. Фазовая самомодуляция
 - 6.4.5. Четырехволновое смешение
 - 6.4.6. Модуляционная неустойчивость
 - 6.4.7. Формирование солитонов
 - 6.4.8. Фазовая кросс-модуляция
- 6.5. Поляризационные свойства
 - 6.5.1. Поляризационная модовая дисперсия (PMD)
 - 6.5.2. Потери, обусловленные поляризацией
 - 6.5.3. Поляризационный провал усиления
- 6.6. Другие типы ухудшений системы передачи
 - 6.6.1. Накопленный шум, связанный с оптическим усилением
 - 6.6.2. Эффект самофильтрации
- 6.7. Выбор оптических фильтров по их дисперсионным

характеристикам

- 6.7.1. Характерные параметры одномодового ОВ, соответствующего стандарту ITU-T G.652
- 6.7.2. Характерные параметры одномодового ОВ с сдвигом нулевой дисперсии, соответствующего стандарту ITU-T G.653
- 6.7.3. Характеристики одномодового ОВ со сдвигом волны отсечки, соответствующего стандарту ITU-T G.654
- 6.7.4. Характерные параметры одномодового ОВ с ненулевой смещенной дисперсией, соответствующего стандарту ITU-T G.655

Глава 7 Регенераторы и волоконно-оптические усилители

- 7.1. Введение
- 7.2. Применение регенераторов в оптических системах
 - 7.2.1. Регенераторы в сетях SONET
- 7.3. Волоконно-оптические усилители
 - 7.3.1. Типы волоконно-оптических усилителей
 - 7.3.1.1. Усилители на лазерных диодах
- 7.4. Критические рабочие параметры усилителей типа EDFA
 - 7.4.1. Усиление и выходная характеристика
 - 7.4.2. Усиленная спонтанная эмиссия (ASE)
- 7.5. Рамановские усилители

Глава 8 Мультиплексирование с разделением подлине волны

- 8.1. Возрастают истребований на пропускную способность ВОСП
- 8.2. Основы WDM-систем
- 8.3. Интерферометр Фабри—Перо
- 8.4. Фильтры Маха—Цендера
- 8.5. Решетки Брэгга и волоконно-оптические решетки Брэгга (FBG)
 - 8.5.1. Некоторые характерные применения FBG

- 8.6. Фильтры на тонких пленках
 - 8.6.1. Оптические фильтры — подведение итогов
- 8.7. Дифракционная решетка на массиве волноводов
- 8.8. Прямая и обратная операции интерливинга
- 8.9. Рекомендации ITU-T (МСЭ) по назначению длин волн, используемых в системах WDM
 - 8.9.1. Выбор минимального шага и стандартных несущих частотного плана систем WDM
- 8.10. Типичные характеристики систем WDM

Глава 9 Синхронные оптические сети SONET и синхронная цифровая иерархия SDH

- 9.1. Введение
- 9.2. Синхронные оптические сети (SONET)
 - 9.2.1. Структура синхронных сигналов
 - 9.2.2. Указатель полезной нагрузки
 - 9.2.3. Три уровня заголовков SONET
 - 9.2.4. Процесс сборки/разборки SPE
 - 9.2.5. Мультиплексирование ввода-вывода (ADM)
 - 9.2.6. Автоматическое защитное переключение (APS)
 - 9.2.7. Кольцевая архитектура SONET
- 9.3. Синхронная цифровая иерархия SDH
 - 9.3.1. Введение
 - 9.3.2. Стандартные скорости передачи SDH
 - 9.3.3. Определения
 - 9.3.4. Основная схема мультиплексирования SDH
 - 9.3.5. Структура фрейма для интерфейса 51,84 Мбит/с
 - 9.3.6. Методы мультиплексирования SDH
 - 9.3.7. Указатели
- 9.4. Заключение

Глава 10 Соединение оптических систем на инженерном уровне

- 10.1. Понятие бюджета линии связи
- 10.2. Расчетные допуски для линии связи
 - 10.2.1. Таблицы контроля
 - 10.2.2. Практические таблицы ITU-T (МСЭ)
- 10.3. Бюджет линии связи: примеры
 - 10.3.1. Общие правила
 - 10.3.2. Пример 1
 - 10.3.3. Пример 2
 - 10.3.4. Пример 3
 - 10.3.5. Пример 4
- 10.4. Полоса пропускания линии связи, время нарастания фронтов, накопленная дисперсия
 - 10.4.1. Бюджет времени нарастания
- 10.5. Определение уровней оптической мощности
 - 10.5.1. Уровень мощности канала
 - 10.5.2. Максимальная полная мощность

Глава 11 Наружная прокладка ВОЛС

- 11.1. Введение
- 11.2. Прокладка кабеля в грунт
 - 11.2.1. Стандарты маркировки наружной кабельной прокладки
 - 11.2.2. Глубина прокладки
 - 11.2.3. Маркировка на трассе
 - 11.2.4. Вертикальные опоры
 - 11.2.5. Устройство вводов
 - 11.2.6. Прокладка кабеля через водные преграды
 - 11.2.7. Пересечение железных дорог
 - 11.2.8. Прокладка по мостовым переходам
 - 11.2.9. Пересечение автомагистралей

- 11.2.10. Экскаваторные работы и повреждения
- 11.2.11. Восстановление повреждений
- 11.3. Планирование трассы и прокладка ВОЛС
 - 11.3.1. Волоконно-оптические кабели
 - 11.3.2. Планирование трассы прокладки
 - 11.3.3. Особенности прокладки кабеля
- 11.4. Измерения при внешней кабельной прокладке и приемосдаточные испытания
 - 11.4.1. Полное затухание
 - 11.4.2. Дисперсия
 - 11.4.3. Тестирование показателей ошибок
- 11.5. Подводные кабельные системы
 - 11.5.1. Меры по улучшению доступности

Глава 12 Доступность и безотказность систем

- 12.1. Важность показателей доступности и безотказности
 - 12.1.1. Определения доступности и безотказности
 - 12.1.2. Безотказность и форс-мажорные обстоятельства
 - 12.1.3. Определение отказа канала
 - 12.1.4. Показатели доступности короткой секции (Telcordia)
 - 12.1.5. Ссылки на стандарты по надежности электронного оборудования и систем
 - 12.1.6. Основные требования для систем передачи (TSGR): оценка надежности оборудования
- 12.2. Взаимосвязь показателей надежности
- 12.3. Вычисление доступности системы
 - 12.3.1. Доступность и недоступность
- 12.4. Сетевая архитектура и безотказность
 - 12.4.1. Автоматическое защитное переключение (APS)
 - 12.4.2. Активирование переключения

- 12.4.3. Восстановление
- 12.4.4. Надежность и доступность защитного переключения
- 12.4.5. Варианты защиты линейных сегментов
- 12.4.6. Самовосстанавливающееся кольцо (SHR) SONET
- 12.4.7. Конфигурация кольца
- 12.5. Центр управления работой сети (NOCC)
 - 12.5.1. Доставка информации о статусе и показателях ошибок в NOCC
 - 12.5.2. Язык TLI
- 12.6. Показатели ошибок и сообщения об аварийных ситуациях в SONET
 - 12.6.1. Структура заголовков по их уровням
 - 12.6.2. Мониторинг показателей ошибок
 - 12.6.3. Сигналы, используемые для обслуживания системы
 - 12.6.4. Каналы инженерной связи
 - 12.6.5. Каналы пользователей
 - 12.6.6. Каналы передачи данных (DCC)
- 12.7. Минимизация необходимых запасных узлов

Глава 13 Варианты сетевого питания для улучшения доступности системы

- 13.1. Бесперебойное питание
- 13.2. Кинетические системы с маховиком
- 13.3. Обычные статические системы бесперебойного питания
 - 13.3.1. Классификация обычных статических систем бесперебойного питания
 - 13.3.2. Указания по использованию вторичных элементов
 - 13.3.3. Перезарядка/выравнивание заряда
 - 13.3.4. Емкость батареи
- 13.4. Питание удаленных пунктов

13.4.1. Газотурбинные генераторы питания

13.4.2. Топливо сберегающая альтернатива

Глава 14 Гибридные системы, использующие медные жилы и оптоволокно

14.1. Введение

14.2. Основные сведения

14.2.1. Логическое обоснование

14.3. Использование передачи КТВ по волоконно-оптическому пролету КТВ магистрали

14.3.1. Передача АМ сигнала КТВ по волоконно-оптическому пролету

14.3.2. Комментарии и обсуждение бюджета мощности волоконно оптического линии

14.4. Установка волоконно-оптического оборудования как можно ближе к ТВ приемнику пользователя

14.5. Двухнаправленная схема КТВ

14.5.1. Назначение сегментов спектра КТВ для обратного трафика

Глава 15 Внутриобъектная кабельная прокладка с использованием волоконной оптики

15.1. Введение

15.2. Диапазон используемых приложений

15.2.1. Создание вертикальной (магистральной) и горизонтальной кабельной прокладки

15.3. Топология сети

15.3.1. Кампусная магистральная сеть

15.4. Замечания по поводу прокладки волоконно-оптического кабеля

15.4.1. Оптические разъемы, рекомендуемые для использования

при прокладке волоконно-оптического кабеля в здании

15.4.2. Практика кабельной прокладки — учет полярности

15.5. Выбор кабеля и его использование

15.6. Тестирование эксплуатационных характеристик корпоративной сети

15.6.1. К вопросу о показателях корпоративной сети

15.6.2. Подготовка плана и методология тестирования

Глава 16 Средства, используемые для поиска неисправности сети

16.1. Сценарий

16.2. Оборудование для тестирования

16.3. Процедуры тестирования, использующие измерители оптической мощности

16.3.1. Измерение обрывов оптоволокну в ВОК, используя измерители оптической мощности

16.4. Введение в оптическую рефлектометрию во временной области (OTDR)

16.5. Тестирование BER и другие процедуры тестирования ошибок

16.5.1. Понятие BERT

16.6. Оптические спектроанализаторы (OSA)

16.7. Анализаторы световых сигналов

16.8. Оптические каналы супервизорного контроля

Глава 17 Функционирование оптической сети

17.1. Введение

17.2. Требования новых оптических технологий

17.3. Распределенная коммутация

17.4. Оверлейные сети

17.4.1. Появление двухуровневых сетей

17.5. Оптическая коммутация

- 17.5.1. Коммутация с помощью MEMS
- 17.6. Практические оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM)
 - 17.6.1. OADM и ОХС улучшают доступность и безотказность системы
- 17.7. Совершенствование управления новой сетевой архитектурой
- 17.8. Полностью оптические кросс-коммутаторы
- 17.9. Варианты сигнализации для оптического уровня
- 17.10. Четыре класса оптических сетей
 - 17.10.1. Общие типы сетей
- 17.11. Обзор многопротокольной коммутации с использованием меток (MPLS)
 - 17.11.1. Введение
 - 17.11.2. Основные термины технологии MPLS
 - 17.11.3. Архитектура MPLS-сетей
- 17.12. Заключение

Список литературы

Список литературы на русском языке, добавленный редактором перевода

Предисловие к русскому изданию

Оптическое волокно и волоконная оптическая техника играют в современной связи определяющее значение, первое — как среда для оптической цифровой передачи, вторая — как набор средств, дающих возможность осуществления такой передачи. Технологии, используемые этими средствами, могут быть, в принципе, различны, но должны быть транспортными. К таким в настоящее время относят: ATM, IP, ISDN, PDH, SDH/SONET и WDM.

Инженерам-проектировщикам, разрабатывающим проекты современных волоконно-оптических линий связи, нужно обладать большой совокупностью знаний, чтобы уметь грамотно выбрать соответствующий тип кабеля, технологию передачи, а затем оборудование. После чего, они должны убедиться, что разработанная ими система передачи не только работает и стыкуется на уровне стандартных интерфейсов с окружающими ее сетями, но и гарантированно обеспечит заложенный ими (часто под давлением заказчика) показатель доступности. Не говоря явно, я, конечно, полагал, что выбор проектировщиков будет в пользу волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), максимально демонстрирующих современный уровень внедрения оптических технологий в цифровые сети связи, а в качестве технологий ВОСП, так или иначе, будет фигурировать тройка: IP-SDH-WDM.

К сожалению, упомянутую выше «совокупность знаний» проектировщикам будет трудно почерпнуть, если ориентироваться на отечественный книжный рынок. Несмотря на то, что на нем за последнее время появилось много интересных книг (см. Список книг на русском языке в конце книги), большинство из них посвящены волокнам и кабелям [А-10 — А-14], или кабельным системам [А-15 - А-17]. Что касается техники, то на нашем рынке читатель найдет лишь несколько серьезных книг по современным технологиям ВОСП [А-4, А-8, А-21, А-25], которые, к сожалению, покрывают только отдельные фрагменты требуемого и, конечно,

не смогут удовлетворить проектировщиков в целом. Поэтому появление любой приличной книги, покрывающей брешь современного «лоскутного» книжного одеяла, с моей точки зрения, можно только приветствовать. В этой ситуации, я и принял предложение о переводе книги Р.Фримана, поступившее мне от издательской группы «Техносфера».

Книга Фримана для русского читателя — это первое серьезное введение в ВОСП, охватывающее все стороны вопроса: от волокна, кабеля и их характеристик, через используемые технологии оптических сетей с их проблемами, до систем бесперебойного питания, обеспечивающих надежное функционирование ВОСП. По широте охвата и освещения вопросов проектирования - это вообще первая книга по ВОСП подобного рода на русском языке. Она удачно дополняет материал книги [А-21], покрывая вопросы выбора пассивных оптических элементов, прокладки кабеля, маршрутизации и защиты трафика, систем бесперебойного питания, расчета показателей производительности и доступности сети. Помимо этого, в ней рассмотрены оптические сети кабельного телевидения. По уровню охвата ей можно будет противопоставить только второе издание книги [А-4], которое должно появиться в начале следующего года.

Книга Фримана — это «не простой подарок» переводчику и читателю. Она написана неровно, с разным уровнем и глубиной изложения для разных разделов. Изобилует длинными предложениями, повторами, а иногда и трудно понимаемыми мыслями и сравнениями. Однако ее широта охвата и большой объем труднодоступного нам фактического материала, как мне кажется, покрывает все эти недостатки.

Как переводчик, я переводил максимально близко к авторскому тексту, стараясь сохранить стиль автора. Как редактор, я пытался сглаживать углы не только перевода, но и авторского текста, и кое-что поправлял или разъяснял, пытаясь сделать текст более понятным (разъяснения даны в скобках со звездочкой и встроены в текст). Для русского издания мною составлен список книг на русском языке по оптоволоконной технике и технологии, по-

явившихся за последние 10 лет на наших прилавках (не думаю, что я пропустил что-то существенное).

В заключение, хочу выразить свою благодарность профессору МТУСИ Соколову С.А. и гл. инженеру компании «Волоконная оптическая техника» Комарову М.Ю. за помощь в редактировании гл. 11 «Наружная прокладка ВОЛС», ее стиль и терминология от этого, думаю, только выиграли.

Желаю всем читателям, как специалистам в области связи, так и, особенно, студентам, аспирантам и просто интересующимся, вдумчивого чтения и последующего углубления знаний по отдельным вопросам с использованием первоисточников или других доступных книг, включая и те, что указаны дополнительно.

*Николай Слепов,
октябрь 2003г.*

Предисловие автора

Волоконная оптика прошла большой путь за последние 20 лет. Она была выбрана в качестве среды передачи наземных систем связи. На семинарах по телекоммуникациям я, обычно, говорю своим слушателям, что оптическое волокно имеет бесконечную полосу пропускания, независимо от того, какие бы намерения и цели не ставились. Конечно, это не так, но для тех, кто пришел к волокну из области беспроводной связи и радиосвязи, это так и есть. Фактически, весь используемый радиоспектр может быть размещен в спектре, передаваемом по одному волокну, и при этом останется очень много свободной полосы.

Требования к полосе пропускания удваиваются каждые три года (см. замечание в гл.17). Только оптоволокно может удовлетворить транспортировке требуемой полосы. Количество оптоволокон, которое собираются уложить в землю и под воду поистине захватывающее. Инженеры проектировщики оптоволоконных систем должны спроектировать и установить огромное количество волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) сейчас, и в ближайшем будущем. Будучи установлена, ВОСП требует обслуживания, как и другие системы.

Эта книга адресована сетевым архитекторам, инженерам и специалистам, кто планирует, устанавливает и эксплуатирует ВОСП. В первых главах читателям дается достаточно много общей оптоволоконной теории, чтобы дать возможность в последующих главах сконцентрироваться на практических вопросах. Хороший четырехлетний курс математики высшей школы дает, конечно, прекрасный базис для освоения того материала, что приводится в тексте. Здесь не требуется ничего специального, кроме алгебры, планиметрии и логарифмов. Знания в объеме семестрового курса физики (раздел оптики) будут полезны, но и их отсутствие не будет большим препятствием.

Книга хорошо документирована. Везде, где нужно, даны ссылки.

Многие из цитируемых источников очень хорошо знакомы, например, такие, как компания Telcordia с ее прекрасными документами — стандартами EIA/TIA и документами по тестированию, или документация секции ITU-T, в частности, ее серии стандартов G.600 и G.900. Мне также удалось получить консультации в промышленности. В списке тех, кто помог мне консультациями, такие компании, как: Alcatel, Releigh, Times Fiber and Cable, Corning Cable Systems, Belden и AMP.

В тексте вы также найдете практические примеры. Линии связи относятся к двум классам: линии с ограниченными потерями и линии с ограниченной дисперсией. Описывая эти классы, я старался показать, как лучше всего уменьшить потери линии или, как преодолеть влияние дисперсии на цифровой сигнал. Это дает путь к пониманию того, как лучше всего проектировать линию, чтобы минимизировать влияние этих двух факторов ухудшения показателей ВОСП.

Я участвовал в нескольких проектах по созданию крупных оптоволоконных систем в качестве консультанта. Каждый из проектов многому меня научил. Первое из усвоенного - доступность системы. Я сосредоточился на ней и рассматривал это понятие под разными углами зрения. Могут ли форс-мажорные обстоятельства играть против нас? Мы обманываем самих себя и наших клиентов, если мы не принимаем во внимание возможности появления таких обстоятельств.

Во время практических упражнений по вычислению доступности, как с теоретической, так и с практической точек зрения, я уяснил важность поддержания и непрерывного снабжения системы питанием, как постоянным - 48 В, так и переменным - 120/240 В. Учитывая их важность и влияние на доступность, я решил включить в книгу главу о бесперебойном питании. В ней была рассмотрена необходимость использования дистанционного питания там, где нет возможности использовать коммерческие источники питания. Нами было подчеркнуто, что применение газотурбинного генератора может быть одним из наиболее эффективных альтернатив при таком

использовании.

Целая глава посвящена технологии DWDM (плотному мультиплексированию с разделением по длине волны) - одной из наиболее важных технологий увеличения емкости существующих мультиплексоров. Наиболее важный вопрос здесь - минимальный шаг между несущими. Во время написания этой книги развитие остановилось на возможности использовать 160 несущих на одно волокно.

Обсуждениями вопросов ухудшения передачи света пронизан весь текст. Эта группа вопросов все еще так важна, что в книге наиболее интересным из них посвящена целая глава. Были рассмотрены такие типы нелинейных эффектов, как вынужденное рассеяние Бриллюэна (точнее Мандельштама-Бриллюэна) и вынужденное комбинационное рассеяние Рамана, четырех-волновое смешение и др. (всего 14 различных типов).

Основным рынком для оптического волокна является сегодня индустрия кабельного телевидения с кабельными системами HFC — гибридными волоконно-коаксиальными кабельными системами. Эти системы превратили КТВ из простой индустрии развлечений в полноправного игрока на рынке широкополосных двусторонних цифровых услуг, включая Интернет. Волоконно-оптическая технология должна гордиться таким достижением, как включение в ее сферу КТВ-услуг. Эта глава содержит краткое введение в КТВ, а затем демонстрирует, как, используя цифровую технику передачи, доставить резидентам последней мили и другим бизнес-пользователям требуемые услуги.

Моя цель в этой книге — постараться донести все это до широкой аудитории, объясняя трудные концепции простым языком. Что следует потенциальному пользователю искать в показателях производительности хорошо спроектированной ВОСП? Что является наиболее экономически эффективным средством достижения этой цели? Дать ответы на эти два первичных вопроса и является основной целью книги.

Роджер Л. Фриман.

ГЛАВА 1 ВВЕДЕНИЕ В ПЕРЕДАЧУ СИГНАЛА ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

1.1. Требования к полосе пропускания

Оптическое волокно — среда передачи, используемая в современных наземных сетях связи. Оно позволяет передавать огромное количество информации. Если сопоставить его полосу пропускания и емкость канала связи, считая, что 1 бит/с соответствует 1 герцу полосы, то можно прийти к выводу, что емкость такого канала близка к бесконечности. Фактически, весь используемый радиочастотный спектр (считаем, что он укладывается в полосу 3 кГц — 200 ГГц) может быть передан по одному волокну.

Оптическое волокно хорошо вписывается в схему цифровой передачи. Например, передача по коаксиальному кабелю и паре проводов требует значительно больше повторителей (регенераторов) на условную единицу длины, чем если бы она велась по оптическому волокну. Это соотношение колеблется от 20:1 до 100:1. В результате, накопленный джиттер (дрожание фазы фронтов импульсов) при передаче по оптоволокну значительно меньше, чем при передаче по медным проводам. Это происходит потому, что накопленный систематический джиттер является функцией числа последовательно включенных повторителей.

При современной технологии емкость волокна (эквивалентная битовой скорости) может достигать 10 Гбит/с в расчете на один битовый поток. Используя при этом технологию волнового мультиплексирования можно пропустить по одному волокну не менее 80 таких потоков (В момент перевода этой книги это число составляло уже 320). Простое умножение дает нам цифру эквивалентной емкости 800 Гбит/с. В момент, когда эта книга уже вышла, один битовый поток мог переносить уже 40 Гбит/с. Значит то же умножение 80, но на 40, дает нам цифру эквивалентной емкости 3,2 Тбит/с на

одно волокно. Предположим, что *волоконно-оптический кабель* (ВОК) имеет 24 волокна, из которых 4 резервных. Тогда оставшиеся 20 позволяют организовать 10 симметричных полнодуплексных (двунаправленных) канала. Таким образом, при емкости 3,2 Тбит/с на волокно, получаем общую емкость ВОК в 32 Тбит/с. Эта емкость могла бы удовлетворить на некоторое время предъявляемые в настоящее время требования по емкости канала связи.

При самой сложной технике кодирования (упаковки) и использовании 18 ГГц несущей в полосе 40 МГц можно передать в настоящее время поток в 655 Мбит/с. Если допустить передачу по 10 таких несущих в одну и в другую стороны, то общая транспортная емкость такой системы будет равна 6 Гбит/с, что составит всего 1/500 емкости, передаваемой по одному ВОК. При этом, конечно, *волоконно-оптическая система передачи* (ВОСП), использующая современные методы, не использует аналогичную технику упаковки бит.

1.2. Модель волоконно-оптической системы передачи

Рис. 1.1 представляет простую модель ВОСП. В тексте ниже мы будем часто ссылаться на эту модель. Не нужно большого воображения, чтобы увидеть, что ВОСП аналогична некой радиосистеме или беспроводной системе передач.

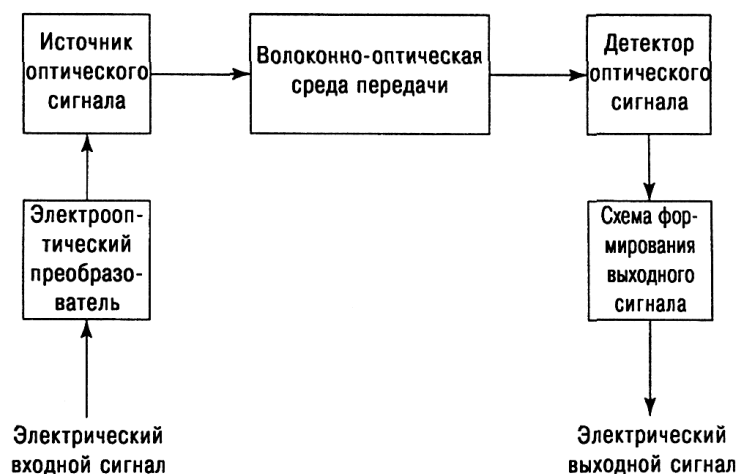


Рис. 1.1. Упрощенная модель ВОСП

В табл. 1.1 приведено сравнение аналогичных рис. 1.1 блоков. В ней приведены блоки, последовательно формирующие указанную выше модель. Это сравнение показывает, что во многих отношениях ВОСП не так уж существенно отличается от проводной (медно-жильной) системы или радиосистемы передачи.

Операции в блоках могут быть аналоговыми или цифровыми. Многие кабельные телевизионные системы используют аналоговый формат, со временем, однако, он все больше меняется на цифровой. Другая форма аналоговых приложений — передача радиосигналов в их естественной форме без использования частотной модуляции.

Возвращаясь к рис. 1.1, опишем кратко функцию каждого блока на блок-схеме, двигаясь слева направо. *Электрооптический преобразователь* (ЭОП) преобразует цифровой электрический сигнал в оптический NRZ- или RZ-сигнал или сигнал, использующий манчестерский код. Он также устанавливает требуемый уровень постоянного смещения входных импульсов. Формы импульсной последовательности и кодов рассмотрены в гл. 4.

Таблица 1.1

Сравнение по методу аналогий

| Волоконно-оптическая линия связи | Радио/беспроводная/проводная линия связи | Комментарий |
|---|--|---|
| Электрооптический преобразователь | Модулятор или формирователь сигнала | Все три случая требуют какого-то преобразования формы сигнала, напр., AMI в NRZ |
| Источник оптического сигнала | Источник сигнала (передатчик или модем) | Выход источника сигнала, как правило низкого уровня |
| Волоконно-оптическая среда передачи | Передача радиосигнала через атмосферу или радио/аудио сигнала по медным проводам | |
| Детектор оптического сигнала | Приемник или демодулятор модема | Порог срабатывания приемника во всех 3 случаях определяет показатели ошибок |
| Схема формирования выходного сигнала | Выход приемника или модема и формирователь сигнала | |

Принципиальный упор в гл. 4 сделан на волоконно-оптический источник светового излучения. В некоторых местах по ходу изложения этот источник назван передатчиком. Существуют два различных источника света, широко используемых сегодня на практике: *светоизлучающий диод* — СИД (LED) и *лазерный диод* — ЛД (LD). Оба источника относятся к устройствам со сравнительно низким уровнем выхода, лежащим в диапазоне от -10 дБм до $+6$ дБм. Они используют модуляцию по интенсивности, которую мы, при первом знакомстве, будем называть модуляцией типа включено-выключено.

Этот источник соединяется с детектором светового сигнала на удаленном конце через одно из оптических волокон в ВОК (другие волокна используются для других целей, в том числе и для резервирования). ВОК подробно рассмотрен в гл. 2. Оптические волокна внутри кабеля могут быть как одномодовыми, так и многомодовыми. Физические размеры волокна (диаметр его сердцевины) определяют какого оно типа. Существуют как экономические, так и эксплуатационные соображения, которые могут определять, какой тип волокна нужно использовать для конкретного проекта.

ВОК поставляется на катушках (или барабанах), представляющих одну кабельную секцию, которая имеет длину 1, 2, 5 и 10 км. (Может определяться также конкретными *строительными длинами*, требуемыми заказчику). Соединительные оптические разъемы (или коннекторы) используются на концах кабелей (с обеих сторон) для соединения кабеля с указанными источником и детектором. Для длинных линий (ВОСП) может потребоваться несколько таких катушек. Строительные длины соединяются друг с другом путем сращивания. Сростки и оптические разъемы рассматриваются в гл. 3. В связи с этим, обычно, рассматриваются два наиболее важных параметра: *вносимые потери* и *возвратные потери*. Вносимые потери, вызванные наличием сростка, должны быть меньше $0,1$ дБ, тогда как аналогичные потери, вызванные наличием оптического разъема, должны быть меньше 1 дБ. Возвратные потери (или потери на отражение), определяющие уровень согласования импедансов между сростком и кабелем, должны быть не менее

30 дБ.

Приемник, или детектор светового излучения на удаленном конце волоконно-оптической линии, является, по сути, счетчиком фотонов. Большинство ВОСП в настоящее время используют два типа приемников: *PIN-diode* и *лавинный фотодиод* (ЛФД). PIN-диод, в целом, проще и менее чувствителен к изменению окружающей среды, так как не имеет внутреннего усиления. ЛФД — более сложен и более чувствителен к изменению окружающей среды, но может обеспечить 10-20 дБ дополнительного усиления. Проектировщик ВОСП выбирает порог приемника, руководствуясь заданным уровнем *коэффициента ошибок по битам* — BER. (Ниже под BER будем понимать Bit Error Ratio (коэффициент ошибок), а не Bit Error Rate (частота ошибок), термин, используемый в оригинале, но не рекомендуемый стандартами ITU-T.).

Порог приемника — уровень входной мощности, выраженный отрицательной величиной дБм и зависящий от ряда факторов: типа приемника, в какой-то мере, его конструкции, скорости передачи и, конечно, уровня BER. При проектировании системы нужно стараться, чтобы уровень сигнала на входе приемника не был избыточным. На коротких секциях часто требуется использовать оптический аттенюатор последовательно с приемником, чтобы сместить уровень входного сигнала в желаемый диапазон [1.1].

В табл. 1.2 приведены сравнительные данные влияния различных причин на ухудшение показателей различных систем: ВОСП, радиосистем, беспроводных систем и проводных систем передачи.

1.2.1. Диапазоны длин волн, используемые для передачи сигнала по оптоволокну

Радио, проводные и кабельные системы передачи используют понятие частоты для описания рабочей области, занимаемой системой в радиочастотном спектре. Частота при этом измеряется в герцах. Говорят, что ВОСП -

плод исследования и разработки физиков, поэтому для описания положения их рабочей области в радиочастотном спектре используется понятие длины волны.

Таблица 1.2

Сравнение влияния разных причин на ухудшение показателей различных систем передачи

| Показатель/ причина | Радиосистемы и беспроводные системы | Проводные системы | ВОСП |
|---|---|---|---|
| BER | 1×10^{-9} | 1×10^{-10} | 1×10^{-12} |
| Потери линии (дБ) | Принципиальные ухудшения | Принципиальные ухудшения | Принципиальные ухудшения |
| Дисперсия | Могут быть ухудше- ния при большой скорости | Не являются первопричиной ухудшения | Могут быть ухуд- шения при большой скорости |
| Замирания | Влияют | Нет | Нет |
| Накопленный джиттер | Умеренно влияет | Сильно влияет | Мало влияет |
| Незащищенность | Низкая | Средняя | Высокая |
| Емкость канала | Низкая/средняя | Низкая/средняя | Очень высокая |
| Потери поглощения при дожде | Основные потери на частоте 10 ГГц | Нет | Нет |
| ЭМС: чувстви- тельность к электромаг- нитному излучению | Существует | Существует | Нет |
| ЭМС: генерация электро-магнитного излучения | Существует | До некоторой степени | Нет |

Замечания. BER — ВОСП проектируются в общем случае в расчете на $BER = 1 \times 10^{-12}$. ВОСП либо имеют ограничения по потерям сигнала, либо по (*накопленной) дисперсии. Радиосистемы и беспроводные системы передачи могут иметь ограничения по дисперсии. Однако пространственное разнесение и автоматическое выравнивание сигнала *промежуточной частоты* (ПЧ) позволяют бороться с дисперсией. Эти вредные эффекты дают аналогичный результат, а именно: межсимвольные искажения, приводящие к ухудшению или серьезному ухудшению показателей ошибок. Проводные системы имеют ограничения по потерям сигнала. *Незащищенность.*

Проводные системы и ВОСП слабо защищены от случайного или намеренного обрыва кабеля. И те и другие страдают и от воздействий окружающей среды, таких как повреждения от воды или мороза. Основным недостатком ВОСП - их незащищенность. В гл. 9 мы обсудим, как ослабить влияние такой незащищенности, но ее нельзя исключить полностью. *Потери при дожде.* Широкая полоса используемых частот в радиосистемах и беспроводных системах достигается на частотах выше 10 ГГц, что приводит к уменьшению длины линии передачи, вызванному потерями на поглощение сигнала при дожде; чем выше частота, тем больше ограничений на время доступности (т.е. надежного распространения). Конечно, для проводных систем и ВОСП время доступности от этого не страдает. ЭМС. Этот показатель имеет два аспекта: чувствительность к излучению и генерация излучения. Генерация излучения означает, что система может быть источником электромагнитных помех (RFI). Чувствительность к излучению ясно говорит о незащищенности от электромагнитных помех. Для радиосистем имеет место как генерация излучения, так и чувствительность к излучению, часто оба явления приводят к проблемам. Проводные системы также чувствительны к электромагнитному излучению. ВОСП - напротив, не излучают и нечувствительны к электромагнитным помехам [1.2].

Будем полагать, что свет - расширение радиочастотного спектра на его высокочастотном конце. Эта концепция непрерывного спектра иллюстрируется рис. 1.2. Для длины волны обычно используется обозначение λ . Так как это *длина*, то ее основной единицей измерения является *метр*. Мы можем связать частоту в герцах и длину волны в метрах (м), используя традиционную формулу

$$F\lambda = 3 \times 10^8 \text{ м/с (скорость света в вакууме)} \quad (1.1)$$

Итак, F в герцах, а λ в метрах.

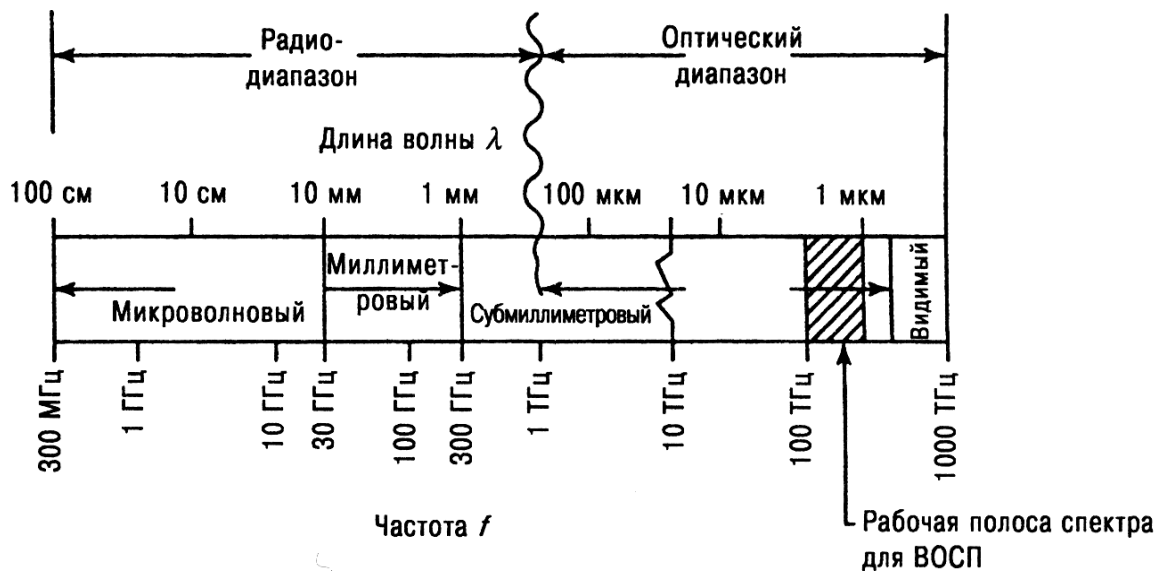


Рис. 1.2. Частотный спектр выше 300 МГц, где показано положение рабочей области ВОСП.

Примеры. Допустим, что ваша любимая ЧМ-станция, транслирует музыку на частоте 104 МГц. Какова ее эквивалентная длина волны?

$$104 \times 10^6 \lambda = 3 \times 10^8$$

$$\lambda = 3 \times 10^8 / 104 \times 10^6 = 2,8846 \text{ м.}$$

Рабочие длины волн в волоконной оптике обычно приводятся в нанометрах (нм). 1 нанометр это: $1 \text{ нм} = 1 \times 10^{-9} \text{ м}$, или 0,000000001 м.

Одна из широко используемых длин волн в ВОСП - 1310 нм. Какова ее эквивалентная частота?

$$1310 \times 10^9 F = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$$

$$F = 3 \times 10^8 / 1310 \times 10^9 = 2,29 \times 10^{14} \text{ Гц,}$$

$$\text{или } 2,29 \times 10^5 \text{ ГГц, или } 229 \text{ ТГц.}$$

При переводе длин волн в частоту для практических целей, например в системах WDM, обычно используют более точную оценку скорости света — 2,99792458, в результате получаем частоту 228,849 ТГц с точностью до 1 ГГц.

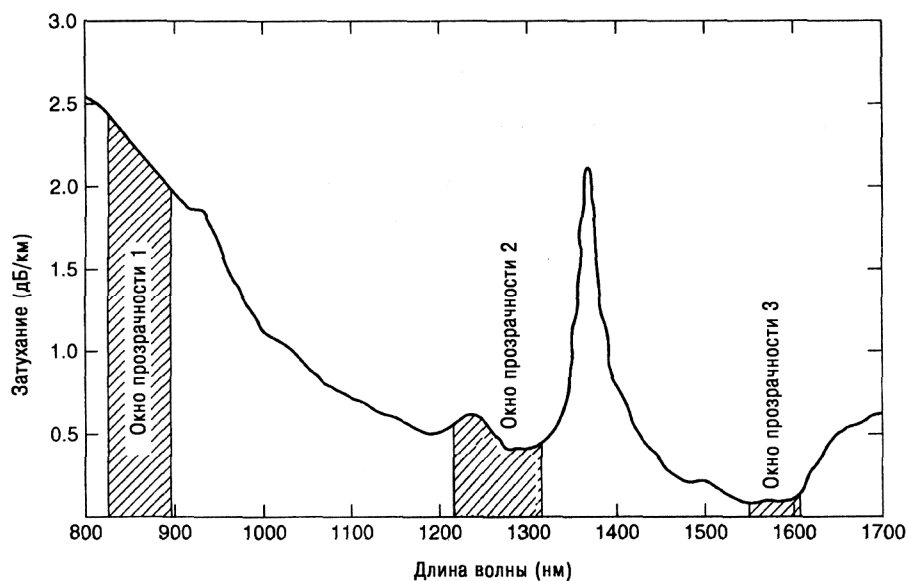


Рис. 1.3. Затухание оптического волокна в зависимости от длины волны (показаны три окна прозрачности, используемые для ВОСП).

На рис. 1.3 показаны три основных окна прозрачности, которые являются рабочими диапазонами длин волн для ВОСП. Это

- 820-900 нм;
- 1280-1350 нм;
- 1528-1561 нм.

Причем последнее окно может быть расширено до 1620 нм (Эта область обычно называют четвертым окном прозрачности). Если оценить частоты, соответствующие последнему окну и его расширению, то, используя уравнение (1.1), можно получить для 1528 и 1620 нм соответственно F_1 и F_2 :

$$F_1 = 3 \times 10^8 / 1528 \times 10^{-9} = 1,96 \times 10^{14} \text{ Гц} = 196 \text{ ТГц}$$

$$F_2 = 3 \times 10^8 / 1620 \times 10^{-9} = 1,85 \times 10^{14} \text{ Гц} = 185 \text{ ТГц}$$

Вычитая F_2 из F_1 получим, что полезная рабочая полоса этих окон равна 11 ТГц, или 11000 ГГц. Эта ширина полосы в 110 раз больше той, что может быть использована в радиочастотной части спектра [1.1].

Полезная ширина полосы одиночно излученного светового импульса определяется импульсной передаточной функцией рассматриваемого опти-

ческого волокна (ОВ). Математический вывод такой передаточной функции довольно сложен и серьезен и выходит за рамки нашей книги. Но мы постараемся представить его схематично. Пусть B_0 — ширина полосы ОВ, а B_c полученная после детектирования ширина полосы результирующего электрического сигнала. Учитывая, что оптическая ширина полосы волокна определяется импульсной передаточной функцией этого волокна, можно показать, что измеренная на уровне -3 дБ (по мощности) оптическая ширина полосы B_0 оценивается с помощью показателя - *полная ширина полосы на уровне половины от максимума* (FWHM), формулой вида

$$B_0 = 441/\text{FWHM} \quad (1.2)$$

полагая, что функция (1.2) имеет вид гауссовской кривой, B_0 измеряется в МГц, а FWHM - в нс.

Далее можно показать, что время нарастания t можно оценить через B_0 с помощью формулы вида

$$t = 315/ B_0 \quad (1.3)$$

Оптическая ширина полосы определяется аналогичным образом, как полоса радиосигнала, отсчитанная на уровне —3 дБ по мощности. Это можно соотнести непосредственно с током /в оптическом детекторе. Так, известно, что электрическая мощность, генерируемая в таком детекторе, пропорциональна I^2 , поэтому уровень —3 дБ оптической мощности (определяемый как уровень, соответствующий 50% уменьшению тока I) приведет к уровню —6 дБ электрической мощности (определяемому как уровень, соответствующий 75% уменьшению тока I^2). Таким образом, уровень -3 дБ оптической ширины полосы равен уровню -6 дБ электрической ширины полосы частот. Это не используется и не будет определяться в дальнейшем. Однако из этого следует, что ширина электрической полосы частот на уровне —3 дБ должна быть меньше, чем ширина оптической полосы на том же уровне -3 дБ. И, хотя математическая сторона этого дела не так проста, если функция имеет форму гауссовой кривой, то можно показать, что

$$B_c = B_0 / \sqrt{2} = 0,707B_0 \quad (1.4)$$

На рис. 1.3 читатель должен заметить так называемый пик поглощения света «водой», расположенный приблизительно на длине волны 1400 нм (фактически на 1383 нм). «Вода» характеризуется наличием примесей в волокне, но показанный нами пик поглощения вызван фактически наличием радикалов ОН. Результатом этого является высокий уровень поглощения вокруг 1400 нм [1.3].

1.3. Волоконно-оптический световод как среда передачи

1.3.1. Конструкция световода

Жила ОВ может быть названа *оптическим световодом*. Можно предположить, что этот термин был заимствован у радистов, использующих аналогичное понятие — *волновод*. На рис. 1.4 показана жила волокна и составляющие ее части. Конечно, ее изображение существенно увеличено и схематично, чтобы заострить внимание на ряде моментов. На нем видно, что жила ОВ состоит из внутренней *сердцевины* и окружающей ее *оболочки*. Любые дополнительные покрытия (оболочки) являются защитными. На рис. 1.4 показано внешнее пластиковое покрытие.

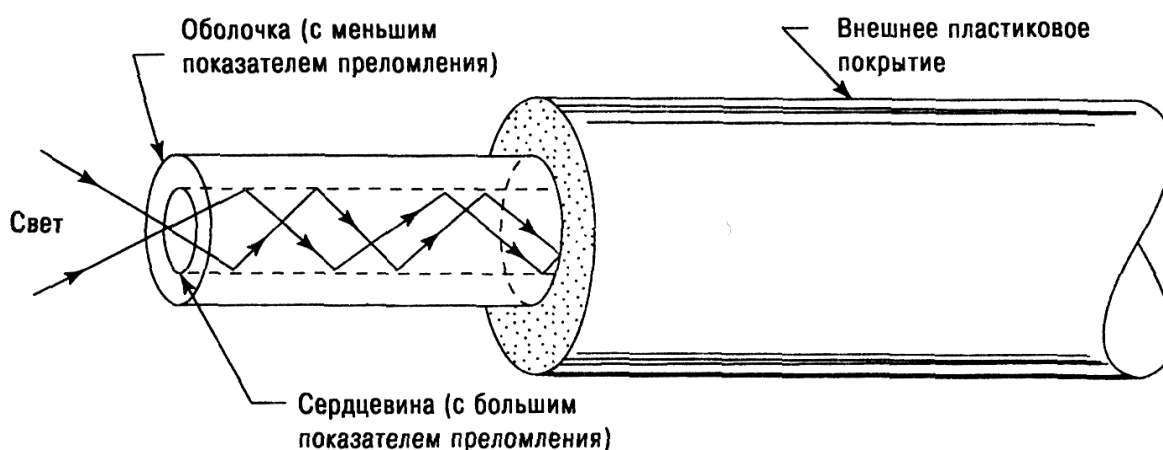


Рис. 1.4. Основная конструкция оптического волокна

Обычно, показатель преломления сердцевины обозначают как n_1 , тогда

как показатель преломления оболочки обозначают как n_2 . Это важные параметры и мы рассмотрим их ниже. Когда жила ОВ спроектирована так, что $n_1 > n_2$, то структура: сердцевина-оболочка, ведет себя как волновод. Кварцевое стекло (SiO_2) является основным материалом, как для сердцевины, так и оболочки. Для подгонки нужных значений показателя преломления используются легирующие примеси, такие как бор или германий.

Из физики известно, что показатель преломления среды равен скорости света в вакууме, деленной на скорость света в данной среде. По определению показатель преломления вакуума равен 1.

1.3.2. Как свет распространяется по волоконно-оптическому световоду

Как фактически распространяется свет по ОВ лучше всего объяснить, используя закономерности геометрической оптики и закон Снеллиуса. Упрощенно можно сказать, что когда свет переходит из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления, преломленный луч отклоняется от нормального. Это, например, происходит тогда, когда луч из воды выходит в воздух, отклоняясь от нормального луча на границе раздела между двумя средами. Чем больше становится угол падения на границу раздела, тем больше отклоняется преломленный луч от нормального луча, до тех пор пока преломленный луч не достигает угла в 90° , по отношению к нормальному, и начинает скользить по поверхности раздела. Рис. 1.5 демонстрирует картину при различных углах падения. Рис. 1.5(а) показывает такой угол падения, при котором преломленный луч полностью уходит в свободное пространство. Рис. 1.5(б) показывает такой угол падения, который называется критическим, когда преломленный луч начинает скользить по границе раздела. Рис. 1.5(в) демонстрирует случай *полного внутреннего отражения* (ПВО). Это происходит тогда, когда угол падения превышает критический. Стекловолоконное ОВ, используемое для целей передачи света, требует использования полного внутреннего отражения.

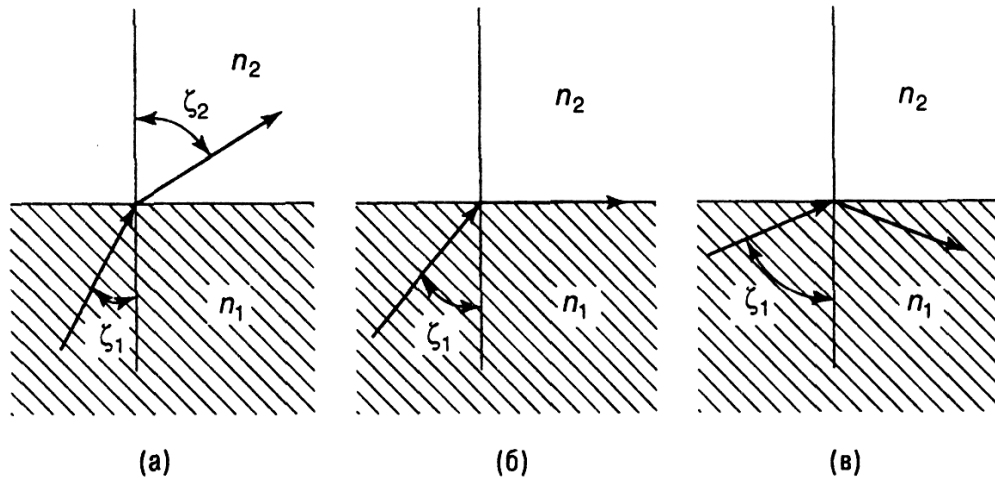


Рис. 1.5. Путь лучей для нескольких углов падения, $n_1 > n_2$, где n_1 и n_2 — показатели преломления двух различных сред (рис. 4, с.15 в [1.2]).

Другое свойство ОВ, характерное для определенной длины волны, это нормализованная частота V :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.5)$$

где a — радиус сердцевины, n_2 для ОВ без оболочки = 1,

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$

Член $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ в уравнении (1.5) называется *числовой апертурой* (NA). В сущности, числовая апертура используется для того, чтобы описать светособирающую способность волокна. Фактически, количество оптической мощности, воспринимаемой ОВ изменяется пропорционально квадрату NA. Интересно заметить, что числовая апертура ОВ не зависит от его физических размеров.

Для лучшего понимания числовой апертуры, рассмотрим рис. 1.6, который иллюстрирует конус света, воспринимаемого волокном. Как показано в формуле ниже этого рисунка, угол этого конуса определяется равенством $\sin q_A = NA$. Концепция светособирающей способности волокна, выраженная численно с помощью NA, хорошо иллюстрируется графически этим приемным конусом.

Как показано на рис. 1.1, существует три основных элемента ВОСП: источник, *волоконно-оптическая линия связи* (ВОЛС) и оптический детектор. Что касается ВОЛС, то существуют два основных параметра, которые ограничивают ее длину без использования повторителей, или длину секции между двумя повторителями. Этими наиболее важными параметрами являются потери, обычно выражаемые в дБ/км, и дисперсия, которая часто выражается в виде эквивалентного *произведения ширины полосы на длину (линии)* - МГц·км. (Это произведение называется обычно *коэффициентом широкополосности*, он используется как показатель только для многомодовых ОВ или ВОК). Длина линии может быть ограничена мощностью (бюджетом мощности), т.е. может ограничиваться потерями, или может ограничиваться дисперсией (накопленной дисперсией).

Дисперсия, проявляющая себя в виде межсимвольной интерференции на удаленном конце, вызвана двумя факторами. Один из них — *материальная дисперсия*, а другой — *модовая дисперсия*. Материальная дисперсия вызвана тем, что показатель преломления материала изменяется с частотой. Модовая дисперсия возникает, если оптоволоконный волновод поддерживает несколько мод. В этом случае различные моды имеют различные фазовые и групповые скорости и их максимумы энергии достигают детектор в различные моменты времени. Учитывая, что в большинстве оптических источников возбуждаются много мод, можно предположить, что они, распространяясь по оптоволоконному волноводу с разной задержкой, приводят к искажениям (дисперсии). Уровень искажений зависит от того, какое количество энергии разных мод доходит в определенный момент времени до входа детектора.

Один из путей уменьшения числа мод, распространяющихся в волокне, лежит в изменении конструкции или размеров волновода. Если вернуться снова к уравнению (1.5), то видно, что число мод, распространяющихся в волокне, можно ограничить путем уменьшения радиуса a при сохранении отношения n_2/n_1 малым настолько, насколько практически возможно, на-

пример, 1,01 или меньше.

Мы можем оценить число мод N , которые волокно поддерживает, используя формулу (1.6). Если $V = 2,405$, то распространяется только одна мода (HE_{11}). Если V больше, чем 2,405, то может распространяться больше, чем одна мода. При относительно большом числе распространяющихся мод можно получить следующую оценку:

$$N=V^2/2 \tag{1.6}$$

Более детально дисперсия обсуждается в гл.7.

ГЛАВА 2 ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

2.1. Типы оптических волокон

Существуют три основных типа оптического волокна (ОВ), отличающихся числом мод и своими физическими свойствами (считают, что этих типов два: одномодовое и многомодовое):

- одномодовое волокно;
- многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления;
- многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления.

2.1.1. Определение диаметра сердцевины

На рис. 2.1 графически представлены сечения многомодового (слева) и одномодового (справа) волокон. Важным в этих рисунках являются сравнительные размеры сердечников многомодового и одномодового волокон.

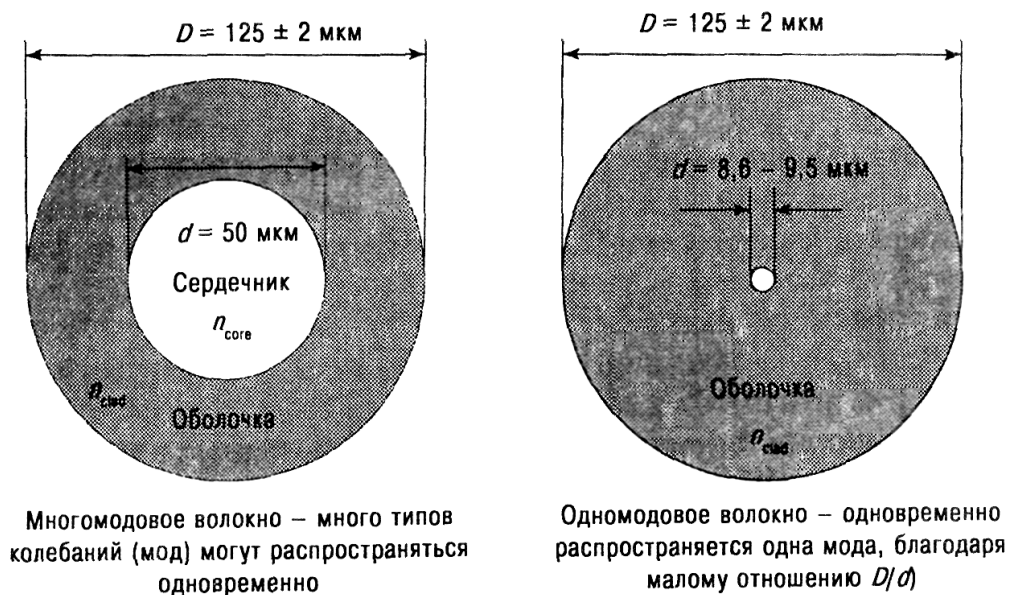


Рис. 2.1. Поперечное сечение многомодового (слева) и одномодового (справа) волокон

Обратите внимание на то, что внешний диаметр обоих типов волокон одинаков и составляет номинально 125 мкм. Однако существует огромная разница в диаметрах сердцевины: 50 мкм для многомодового волокна и 8,6-9,5 мкм для одномодового волокна. На практике существуют и другие значения диаметров многомодового волокна, наиболее используемым из них является 62,5 мкм.

2.1.2. Три типа оптических волокон

На рис. 2.2 показана конструкция и профили показателей преломления: ступенчатый (рис. 2.2(а)) и градиентный (рис. 2.2(б)) для многомодового волокна. Ступенчатый профиль показателя преломления характеризуется резким (в виде ступеньки) изменением показателя преломления (от n_1 к n_2) на границе раздела, тогда как градиентный - плавным изменением.

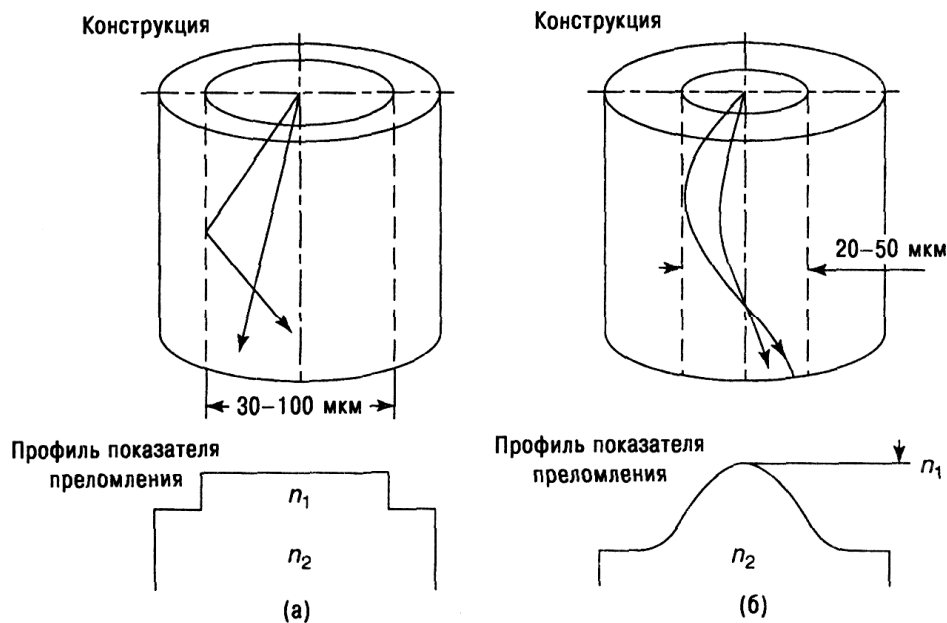


Рис. 2.2. Конструкция и профили показателей преломления: ступенчатый (а) и градиентный (б) для многомодового волокна.

Многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления является более экономичным по сравнению с градиентным волокном. Для многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления коэффициент широкополосности, характеристика,

рассмотренная выше, имеет порядок 10-100 МГц·км, при условии, что повторители расположены на расстоянии 10 км, можно передать полосу частот шириной от 1-10 МГц.

Градиентный профиль показателя преломления делает многомодовое волокно существенно дороже, чем при ступенчатом профиле, однако дает возможность улучшить коэффициент широкополосности. Так, если в качестве источника света используется лазерный диод, то можно довести коэффициент широкополосности до 400-1000 МГц·км. Если же в качестве источника используется СИД, имеющий существенно более широкий спектр излучения (см. материал гл. 4), то с тем же градиентным волокном можно рассчитывать на коэффициент широкополосности порядка 300 МГц·км или выше. Принципиальным ограничивающим фактором в этом случае является материальная дисперсия (см. дискуссию в гл. 6 на эту тему).

На рис. 2.3 показаны профили показателя преломления и характер распространения мод для указанных трех типов ОВ на основе кварцевого стекла.

Одномодовое волокно проектируется так, что в нем может распространяться только одна мода. Благодаря этому $V < 2,405$ (см. формулу 1.5). В таком волокне нет модовой дисперсии просто потому, что распространяется только одна мода. Типично, мы можем встретить волокно с показателями преломления $n_1 = 1,48$ и $n_2 = 1,46$. Если бы длина волны оптического источника света была 820 нм, то для осуществления одномодовых режимов работы потребовалось бы волокно 2,6 мкм, что, конечно мало для современных систем. Рис. 2.3(в) иллюстрирует профиль показателя преломления одномодового волокна. Этот тип волокна демонстрирует значительно лучшие значения коэффициента широкополосности среди описанных трех типов волокон.

Как уже отмечалось в гл. 1, числовая апертура (NA) является мерой светособирающей способности сердцевины волокна. Из рис. 2.1 видно, что значительно больший диаметр многомодового волокна приводит к большим значениям числовой апертуры NA (порядка 0,22), тогда как существенно меньший диаметр одномодового волокна ухудшает сбор света от источника.

В этом случае числовая апертура составляет лишь 0,11.

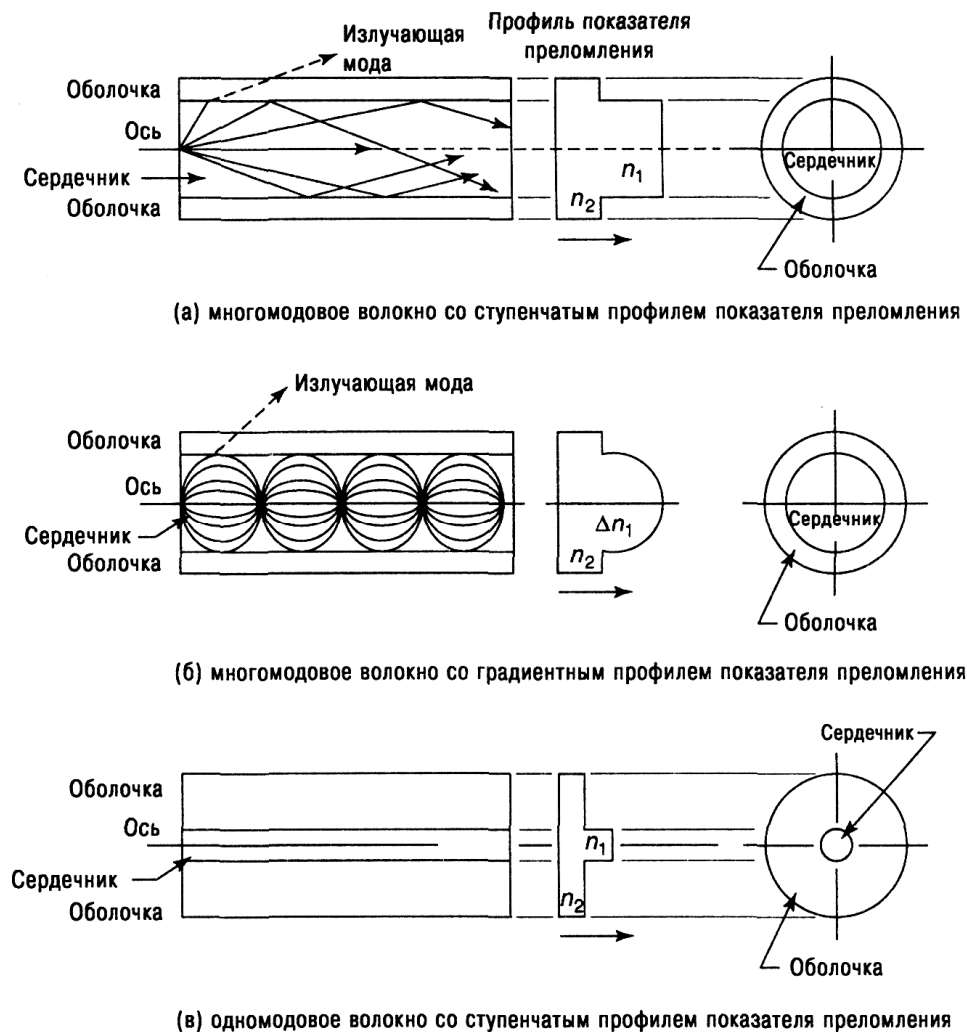


Рис. 2.3. Профили показателей преломления и моды, распространяющиеся в трех типах ОВ.

2.2. Распространение различных мод по оптоволокну

Многомодовое волокно, с его относительно большой сердцевиной, допускает распространение по волокну нескольких или многих мод. Некоторые из этих мод могут распространяться в волокне на небольшие расстояния и потом исчезать; другие — могут распространяться на всю длину волокна. Характер многомодового распространения показан на рис. 2.4. Основная проблема возникает тогда, когда эти моды достигают

удаленного приемника. Рассмотрим импульс, прошедший по волокну некоторое расстояние. Этот импульс несет в себе световую энергию нескольких мод. Мода самого низкого порядка достигнет приемника быстрее всего. Остальные моды за счет задержки вносят свой вклад позднее. Прибывший импульс, составленный из компонентов, распространяющихся дольше, приводит к уширению прибывшего вначале импульса, составленного из моды самого низкого порядка, как показано на рис. 2.4.

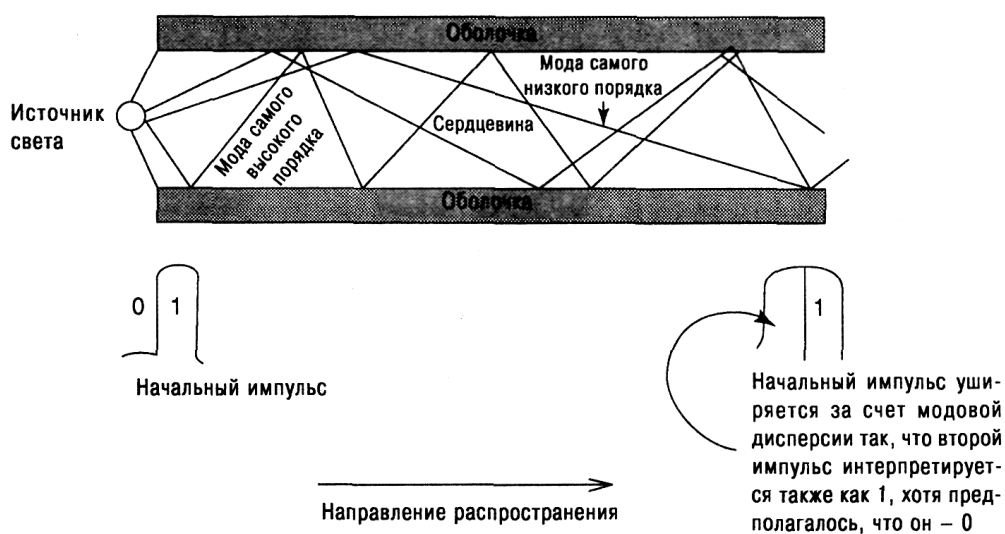


Рис. 2.4. Идеализированный рисунок с импульсом источника света в приемном конусе отрезка многомодового световода (или ОВ), показывающий распространение трех световых мод. Мода самого низкого порядка имеет на рисунке всего два отражения, тогда как мода самого высокого порядка имеет семь отражений на том же самом отрезке световода. В результате энергия моды самого высокого порядка запаздывает по сравнению с энергией моды самого низкого порядка.

Суть проблемы в том, что каждый из этих импульсов, или его отсутствие, представляет двоичные 1 и 0. Пусть наличие импульса соответствует 1, а его отсутствие — 0. И пусть мы передаем последовательность вида 10. Расширенный за счет дисперсии импульс двоичной 1 (как показано на рис. 2.4 внизу справа) займет и соседнюю битовую позицию, которая исходно должна быть двоичным 0. Возникает

типичная битовая ошибка. Это упрощенное описание показывает вредное влияние дисперсии, вызывающей межсимвольную интерференцию.

В этих условиях, при возрастании скорости передачи, когда ширина импульса становится все меньше, а влияние дисперсии все более губительным, уровень ошибок ВЕК на линии передачи достигает таких значений, что становится совершенно неприемлемым.

Эта ситуация может быть сглажена или разрешена путем:

- уменьшения длины передающей линии (сглаживание проблемы);
- уменьшения скорости передачи (сглаживание или устранение проблемы);
- использования одномодового волокна (устранение модовой дисперсии) [2.1, 2.2].

2.3. Микроизгибы и макроизгибы

Микроизгибы вызваны несовершенством волокна. Они вызывают увеличение потерь в кабеле. Эти потери могут быть очень большими и в некоторых случаях могут даже превышать 100 дБ/км [2.1]. Основная причина возникновения этих потерь кроется в процессе производства кабеля. Она связана с искривлениями оси, которые неизбежно происходят в процессе производства кабеля, когда волокно сдавливается недостаточно гладкими внешними покрытиями. Потери от микроизгибов являются функцией диаметра поля моды, конструкции кабеля и его исполнением. Потери от затухания, вызванного микроизгибами, уменьшаются с диаметром поля моды.

Макроизгибы соотносят с некоторым определенным малым радиусом. Производитель кабеля должен указать в спецификации минимальный радиус изгиба. Когда кабель намотан на катушку, то он, конечно, сгибается по радиусу катушки. Если он прокладывается, в частности, в зданиях, то он

может сгибаться на углах. Укладчик не должен уменьшать радиус изгиба меньше минимально допустимого при любой необходимости обхода углов. Обычно предполагается, что типичный радиус изгиба ВОК должен быть между 10 и 30 см в зависимости от числа волокон в кабеле. Сгибая ВОК сильнее, чем это допускается ограничениями на радиус изгиба, можно повредить кабель, даже порвать волокна в кабеле. Это может также вызвать существенное увеличение затухания волокна [2.3, 2.4].

На рис. 2.5 показаны различия между микроизгибами и макроизгибами.

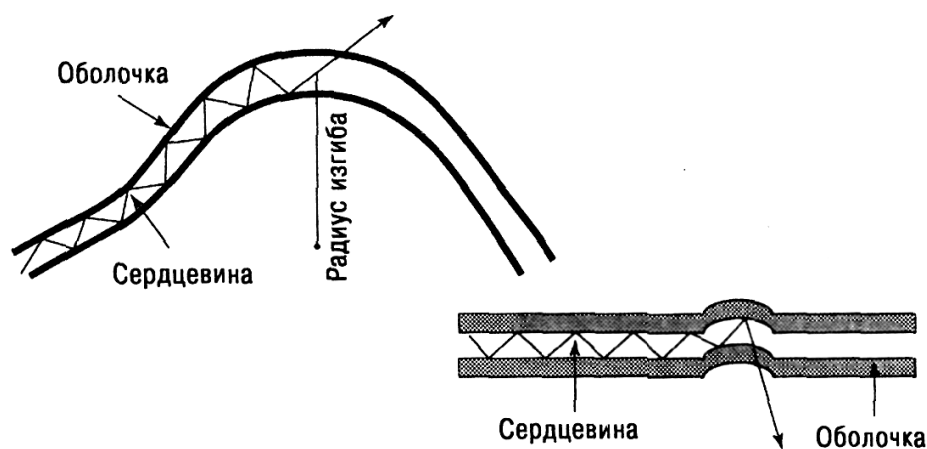


Рис. 2.5. Рисунок, иллюстрирующий макроизгибы (слева) и микроизгибы (справа).

2.4. Конструкция кабеля

2.4.1. Диаметр оптоволокна

Проектировщики ВОСП и монтажники часто ссылаются на типоразмер кабеля в терминах «сердцевина/оболочка». Например, кабель может быть специфицирован как 50/125, что означает, что диаметр сердцевины — 50 мкм, а оболочки — 125 мкм. В этом случае мы сразу можем сказать, что это волокно относится к классу многомодового, благодаря диаметру его сердцевины. Если бы это было одномодовое волокно, то диаметр его сердцевины был бы 7-10 мкм.

Внешняя поверхность оболочки имеет специальное покрытие, внешний диаметр которого 250-500 мкм. В табл. 2.1 приведены основные физические размеры наиболее общих типов ОВ. Значение 900 мкм в последней колонке указывает на использование плотной буферной оболочки, тогда как значения 2000-3000 мкм соответствуют свободной буферной оболочке.

Таблица 2.1

Основные размеры оптического волокна (в мкм)

| Тип | Сердцевина | Оболочка | Покрытие | Буфер или трубка |
|-----|------------|----------|-------------|-------------------|
| I | 7-10 | 125 | 250 или 500 | 900 или 2000-3000 |
| II | 50 | 125 | 250 или 500 | 900 или 2000-3000 |
| III | 62,5 | 125 | 250 или 500 | 900 или 2000-3000 |
| IV | 85 | 125 | 250 или 500 | 900 или 2000-3000 |
| V | 100 | 140 | 250 или 500 | 900 или 2000-3000 |

Замечания. Волокно типа I соответствует одномодовому волокну. Волокно типа II соответствует многомодовому волокну, также как и типа III, IV, V. Волокно типа IV, 85/125, более популярно в Европе, чем в Северной Америке. Волокно типа V, 100/140, имеет самую большую числовую апертуру и захватывает больше всего света, благодаря большой сердцевине. Его потенциальная ширина полосы меньше, чем у других, и используется для перекрытия небольших и средних пролетов. Учитывая его размеры, оно легко монтируется, в частности, если используются оптические разъемы, а не сварка. Его можно встретить в зданиях. (В нашей стране волокна типа IV и V возможно и применяют для специальных целей, но практически не используют не только в глобальных, но и в локальных сетях.)

2.4.2. Плотное буферное покрытие или свободная буферная трубка

Буферизация позволяет изолировать волокно от внешнего воздействия. Два типа буферизации используется на практике: *свободный буфер* и *плотный буфер*, как это показано на рис. 2.6.

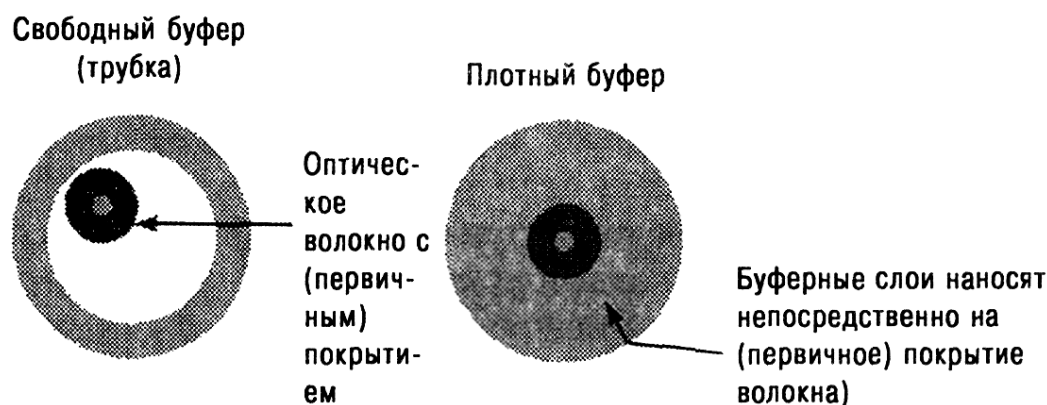


Рис. 2.6. Простые примеры свободной и плотной буферизации волокна.

В конструкции со свободным буфером волокно помещают в пластиковую трубку, внутренний диаметр которой значительно больше внешнего диаметра волокна, как видно из табл. 2.1. Внутренняя поверхность пластиковой трубки обычно покрыта гелем-смазкой.

Свободный буфер изолирует волокно от внешних механических усилий, прикладываемых к кабелю. Для кабелей, содержащих много волокон, ряд таких трубок комбинируют с силовыми элементами конструкции кабеля, чтобы волокна не испытывали напряжения.

Плотная буферизация при производстве кабеля достигается путем использования прямой экструзии (бесшовного покрытия) пластика поверх первичного покрытия волокна. Плотная буферизация меньше изолирует волокно от внешних воздействий (и температурных изменений). С другой стороны она позволяет выдерживать значительно большие физические воздействия без разрушения волокна.

Кабель типа «breakout» — кабель с плотной буферизацией каждого волокна с упрочняющей оплеткой из арамидных нитей и чехлом из ПВХ, в котором упрочненные таким образом волокна соединяются вместе и покрываются общей для кабеля оболочкой. Такой кабель, допуская простую оконцовку каждого волокна, позволяет упростить монтаж кабеля.

Кабель со свободной буферизацией оптимизируется для внешней прокладки. Основные компоненты в структуре ВОК - кварцевое стекло и полимерный пластик. В заданном температурном диапазоне расширение этих материалов (скорость/величина) и конструкции в целом будут разными, учитывая, что каждый материал имеет свой коэффициент расширения. Свободная буферизация дает возможность создать для ОВ условия отсутствия внешних напряжений путем ослабления влияния вышеупомянутых эффектов. Производители таких кабелей уверены, что соотношение длин волокна и буферной трубки выбрано так, что ни при каких условиях сжатия/растяжения от температуры волокно не будет сжато стенками трубки. Условия отсутствия напряжений, обеспечиваемые свободной буферизацией, компенсируют подвижность внутри кабельной системы так, что никаких механических усилий в волокне не возникает. Эта особенность расширяет рабочий диапазон температур таких кабелей.

С другой стороны кабели с плотной буферизацией не позволяют до такой же степени изолировать волокна от действия внешних сил; поэтому температурные эффекты растяжения/сжатия, воздействующие на любой из компонентов такой конструкции, прямо передаются на волокно. В результате кабели с плотной буферизацией, как правило, более чувствительны к перепадам температуры и механическим воздействиям, чем кабели со свободной буферизацией. Конструкция ВОК с плотной буферизацией хорошо приспособлена для внутренней прокладки, при которой дополнительно требуется замедление распространения горения. В этом смысле 900-мкм волокно с плотной буферизацией идеально приспособлено для прямого терминирования линий в кабельных системах. Однако те же конструктивные особенности делают такие кабели непригодными для целей внешней прокладки.

Еще одна особенность кабелей со свободной буферизацией — способность противостоять разрывам, вызванным замерзанием стоячей воды. Вода, проникающая через внешнюю оболочку кабеля, может привести к росту кристаллов льда на сердцевине кабеля. Этот лед может привести к возник-

новению микротрещин в кабеле в окрестности этого места, делая кабель непригодным для использования, ввиду резкого возрастания затухания или даже полного разрыва волокна. Поэтому весьма важно предотвратить неконтролируемое попадание воды в кабель.

Конструкция кабелей со свободной буферизацией позволяет защитить от проникновения воды и ослабить этот эффект, используя две различные предохранительные меры: блокирующую защиту от проникновения воды в сердцевину кабеля и заполнение буферной трубки компаундом. Блокирующая защита осуществляется путем закачки геля вокруг сердцевины кабеля и оборачиванием сердцевины кабеля водопоглощающим материалом, что позволяет остановить проникновение воды или существенно уменьшить ее воздействие в случае повреждения внешней оболочки кабеля. Эти меры защиты призваны, в первую очередь, сохранить механическую целостность самого кабеля (например, предотвратить появление трещин от возникновения ледяных кристаллов, рост плесени или коррозии металлических частей кабеля, если они есть). Заправка компаундом позволяет механически амортизировать волокна, давая им возможность плавать внутри трубки, и создает дополнительный барьер между волокном и водой/сыростью в рабочих условиях. Стандартный ВОК с плотной буферизацией не имеет компаунда или водо-блокирующей защиты, что делает его чувствительным к повреждениям, вызванным проникновением воды.

Другим вопросом является защита от ультрафиолетового (УФ) излучения. При подвеске кабелей, ВОК должен иметь возможность противостоять прямому воздействию солнечного УФ излучения. ВОК со свободной буферизацией содержит углерод в материале внешней оболочки, чтобы обеспечить защиту от УФ. ВОК с плотной буферизацией не содержит углерода во внешней оболочке и значит, не может быть использован как кабель для подвески [2.6].

2.4.3. Силовые элементы

Силовые элементы — важная часть ВОК, особенно в процессе протягивания во время монтажа линии. Уровень напряжений в кабеле в процессе протяжки и других действий при монтаже таков, что может вызвать увеличение потерь за счет возникновения микроизгибов, что в свою очередь приводит к возрастанию затухания и возможным эффектам «усталости» материала. Чтобы снять эти стрессовые нагрузки во время монтажа и эксплуатации, в структуру ВОК добавляются внутренние силовые элементы. Эти элементы обеспечивают свойства растяжения под нагрузкой, подобно тому, что имеет место при прокладке телефонных линий и других кабельных конструкций. Они предохраняют ВОК от перегрузки путем минимизации удлинений и сжатий. Нужно иметь в виду, что оптическое волокно хрупкое и растягивается очень мало, перед тем как разорваться. Таким образом, силовые элементы должны иметь лишь небольшое удлинение под действием ожидаемой растягивающей нагрузки.

Три типа силовых элементов широко используются в конструкции ВОК: эпоксидные стержни из стекловолокна, сталь и арамидные нити. Усилие разрыва первых двух — 480 фунтов (2135 Н), а для арамида — 944 фунта (4199 Н). Процент удлинения перед разрывом равен 3,5 для стекловолокна, 0,7 для стали и 2,4 для арамида. Ударное сопротивление, гибкость и другие механические факторы также влияют на выбор силовых элементов [2.5].

Некоторые типичные кабельные конструкции (в скрутке и их поперечные сечения) показаны на рис. 2.7(а) и 2.7(б). Рис. 2.7(а) дает 4 примера ВОК, используемого на длинных секциях сетей кабельного телевидения (КТВ). За ним следует табл. 2.2(а), в которой приведены типичные физические характеристики этих типов кабеля. В этой таблице проведены кабели компании Belden Beloptix. Все 4 примера ВОК относятся к классу «со свободной буферизацией». Понятия волокна с «выровненным» или с «профильным» показателем преломления оболочки обсуждаются ниже в 2.6.

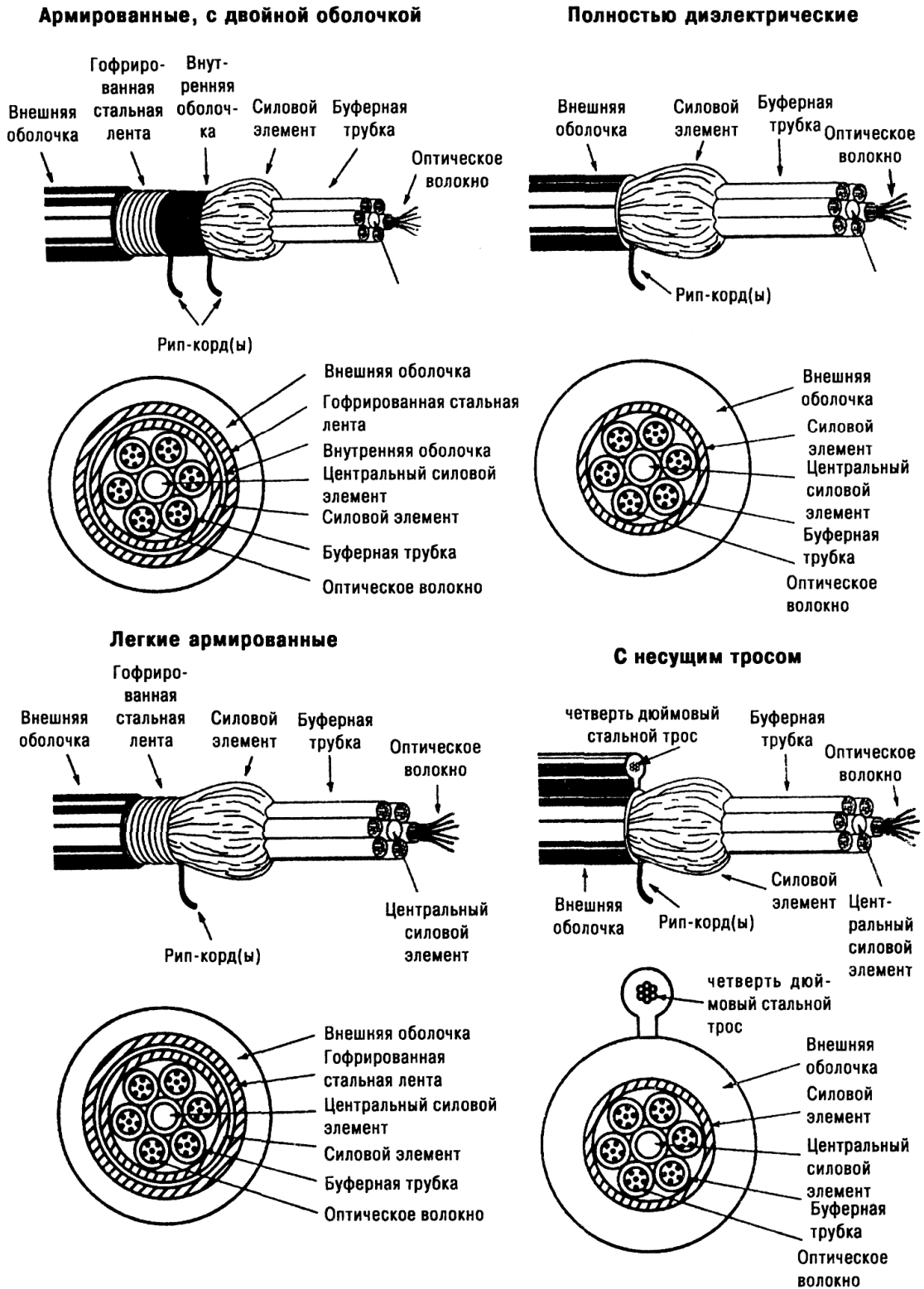
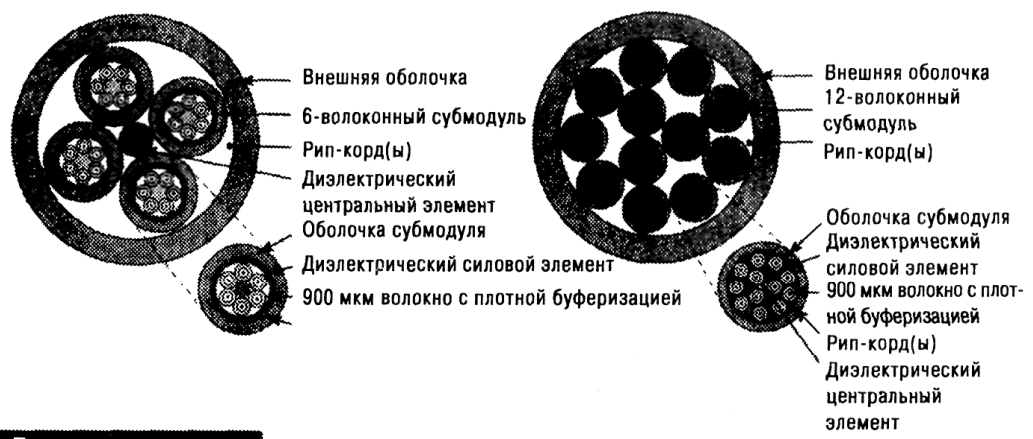


Рис. 2.7(а). Скрутки и поперечные сечения 4 кабелей со свободной буферизацией компании Belden Belortix для использования в длинных секциях частных/общественных КТВ-сетей (с разрешения компании Belden Wire and Cable Inc., Richmond, Indiana [2.5]).

**24(144)-волоконный
ОГНБ-кабель типа Unitized MIC**

**12-волоконный
ОГНБ-кабель типа Unitized MIC**



Применение

Кабели типа Unitized MIC используются в качестве магистральных кабелей внутри зданий при прокладке вертикальных кабелей и кабелей общего назначения)



Рис. 2.7(б). Поперечные сечения скрутки и конструкция кабелей с плотной буферизацией компании Corning Cable Systems для использования внутри зданий. Это пожаробезопасные (с замедленным распространением горения) кабели, удовлетворяющие требованиям кодов NEC (магистральные кабели типа Unitized MIC) (с разрешения компании Corning Cable Systems, LANscape Solution Catalog, с. 1.30 [2.7]).

Рис. 2.7(б) демонстрирует типичные характеристики ВОК с плотной буферизацией для использования в качестве магистральных кабелей внутренней прокладки. Они относятся к типу ВОК «Unitized MIC» компании Corning Cable Systems и имеют от 24 до 144 отдельных кабельных жил. Этот рисунок

использует табл. 2.2(б), которая содержит соответствующие физические характеристики и характеристики передачи.

Таблица 2.2(а)

Физические характеристики ВОК сетей общего пользования компании
Belden.

| Физические данные | Выровненная оболочка | Выровненная оболочка |
|-----------------------------------|---|---|
| Число волокон | 4-288 | 4-288 |
| Тип волокна | Одномодовое | Одномодовое |
| Диаметр оболочки | 125 ± 1 мкм | 125 ± 1 мкм |
| Тип покрытия | Ультрафиолетовый акрилат | Ультрафиолетовый акрилат |
| Внешняя оболочка | Полиэтилен средней плотности (черный) | Полиэтилен средней плотности (черный) |
| Силовой элемент | Арамид и центральный стержень из стекловолокна | Арамид и центральный стержень из стекловолокна |
| Диапазон рабочих температур | -40°C - +70°C | -40°C - +70°C |
| Максимальная нагрузка при монтаже | 2700 Н | 2700 Н |
| Максимальная длительная нагрузка | 600 Н | 600 Н |
| Диаметр поля моды | 9,3 ± 0,5 мкм для $\lambda = 1310$ нм 10,5 ± 1,0 мкм для $\lambda = 1550$ нм | 9,3 ± 0,5 мкм для $\lambda = 1310$ нм 10,5 ± 1,0 мкм для $\lambda = 1550$ нм |

Замечания. Максимальное затухание: на длине волны 1310 нм — 0,35 дБ/км, а на длине волны 1550 нм - 0,25 дБ/км.

Минимальный радиус изгиба (в дюймах) при монтаже — 20 диаметров ВОК. Минимальный радиус изгиба (в дюймах) при длительной эксплуатации — 10 диаметров ВОК (с разрешения компании Belden Wire and Cable [2.5]).

Таблица 2.2(б)

Сводка физических параметров и характеристик передачи магистральных
ВОК типа Unitized MIC компании Corning Cable Systems.

| | |
|----------------------|---|
| Температура хранения | -40°C — +70°C |
| Рабочая температура | -20°C — +70°C |
| Список NEC/CSA | NEC «OFNR», CSA «FT-4» |
| Пожаробезопасность | UL-1666 (для магистральных и общих кабелей в зданиях) |

Таблица 2.2(б). Продолжение

| Число волокон | Число модулей | Номинальный внешний диаметр, мм | Номинальный вес, кг/км | Тип центрального силового элемента | Максимальная растягивающая нагрузка, Н | | Минимальный радиус изгиба, см | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|-------------|
| | | | | | Краткосрочная | Долгосрочная | Рабочая нагрузка | При монтаже |
| 6-волоконный submodule | | | | | | | | |
| 24 | 4 | 12,2 | 120 | G | 2500 | 1000 | 18,2 | 12,2 |
| 30 | 5 | 13,6 | 159 | G | 3500 | 1700 | 20,4 | 13,6 |
| 36 | 6 | 15,2 | 189 | JG | 4000 | 2000 | 22,8 | 15,2 |
| 48 | 8 | 17,9 | 264 | JG | 5000 | 2500 | 26,8 | 17,9 |
| 60 | 10 | 21,1 | 380 | JG | 5500 | 3000 | 31,7 | 21,1 |
| 72 | 12 (9/3) | 20,3 | 301 | G | 5600 | 3000 | 30,5 | 20,3 |
| 12-волоконный submodule | | | | | | | | |
| 72 | 6 | 22,3 | 373 | JG | 7000 | 3500 | 33,5 | 22,3 |
| 84 | 7 | 24,5 | 458 | JG | 7000 | 3500 | 36,8 | 24,5 |
| 96 | 8 | 26,6 | 543 | JG | 8800 | 4000 | 39,9 | 26,6 |
| 108 | 12 (9/3)*** | 30,0 | 492 | | 10000 | 4000 | 45,0 | 30,0 |
| 120 | 12 (9/3)** | 30,0 | 527 | | 10000 | 4000 | 45,0 | 30,0 |
| 132 | 12 (9/3)* | 30,0 | 567 | | 10000 | 4000 | 45,0 | 30,0 |
| 144 | 12 (9/3) | 30,0 | 572 | | 10000 | 4000 | 45,0 | 30,0 |
| Характеристики передачи | | | | | | | | |
| Вариант исполнения | 12 62,5/125 мкм 850/1300 нм | 30 62,5/125 мкм 850/1300 нм | 50 62,5/125 мкм 850/1300 нм | 31 50/125 мкм 850/1300 нм | 31 50/125 мкм 850/1300 нм | 31 Одномодовый 1300/1550 нм | | |
| Максимальное затухание, дБ/км | 3,5/1,0 | 3,5/1,0 | 3,5/1,0 | 3,5/1,0 | 3,5/1,5 | 1,0/0,75 | | |
| Типовое затухание, дБ/км | 3,0/1,0 | 3,0/1,0 | 3,0/1,0 | 3,0/1,0 | 3,0/1,0 | 0,5/0,4 | | |
| Минимальная ширина полосы LED, МГц·км | 200/500 | 200/500 | 200/500 | 500/500 | 500/500 | — | | |
| Минимальная ширина полосы RML, МГц·км | — | 22/— | 385/— | — | — | — | | |
| Гарантированная длина (м) для GE | 275/550 | 300/550 | 500/1000 | 600/600 | 600/600 | 5000 | | |

Замечания. * = 1 модуль-наполнитель (кордель), ** = 2 модуля-наполнителя (корделя), *** = 3 модуля-наполнителя (корделя), все варианты с *, **, *** соответствуют 3 внутренним (центральным) модулям. Число модулей включает и вариант исполнения с двумя слоями модулей. Например, 12 (9/3**) соответствует 9 внешним модулям, расположенным вокруг 3 внутренних (центральных) модулей, два из которых — кордели (с разрешения Corning Cable Systems, см. LANscape Catalog, с. 1.31 [2.7])

2.5. Характеристики оптического волокна

2.5.1. Оптические характеристики

Как отмечалось ранее, в одномодовом волокне распространяется только одна мода на рабочей длине волны. В этой категории оптического волокна мы имеем следующие типы: стандартное одномодовое волокно, волокно со сдвигом нулевой дисперсии и волокно с малой ненулевой дисперсией. Они зависят от конструкции волокна. При тестировании этих типов волокон, нужно помнить, что источник света (лазерный диод или СИД) не является строго монохроматичным, а его выходное излучение покрывает определенную полосу длин волн. В результате того, что время распространения спектральных компонент различно, происходит уширение импульсов. Степень такого уширения пропорциональна спектральной ширине используемого источника. Близкие к монохроматическим (использующие одну продольную моду) лазерные источники (SLM-лазеры), как правило это лазеры с распределенной обратной связью, допускают нормальную работу с одномодовым волокном на длинах волн, которые отстоят от длины волны нулевой дисперсии дальше, чем это позволяют делать лазеры, использующие несколько продольных мод (MLM-лазеры).

Стандарты EIA/TIA — классифицируют одномодовые волокна в соответствии с их дисперсионными характеристиками. Существуют одномодовые волокна без сдвига нуля, которые имеют длину волны нулевой дисперсии в районе 1310 нм (эти волокна обычно называют стандартными одномодовыми-ми волокнами). Эти волокна по классификации EIA/TIA соответствуют классу IVa. Существуют также два типа волокна со сдвигом дисперсии. Один — со сдвигом нуля дисперсии в область 1550 нм (эти волокна обычно называют одномодовыми волокнами со сдвигом дисперсии), который классифицируется EIA/TIA как волокно класса IVb. Другой - с ненулевой смещенной дисперсией, имеет ненулевую (но небольшую по величине) дисперсию в определенной области в окне прозрачности 1550 нм.

Это волокно классифицируется как волокно класса IVd.

В диапазоне 1550 нм затухание волокна может быть значительно ниже, чем в районе 1310 нм для любого типа волокон. Однако дисперсия волокон, спроектированных со сдвигом дисперсии, на длине волны 1310 нм может быть существенно выше, чем дисперсия на той же длине волны, но у волокон без сдвига дисперсии.

2.5.2. Механические характеристики

Одним из основных свойств оптического волокна является его прочность. Однако, в процессе изготовления на поверхности волокна появляются микроскопические изъяны, которые заметно ухудшают базовую прочность. Благодаря процессу производства кабеля и укладке волокна в кабель, происходит дальнейшее ухудшение прочности волокна. Ухудшение прочности и обрыв волокна в результате роста изъянов (трещин) на поверхности можно объяснить тремя причинами: динамической усталостью, статической усталостью и старением в отсутствие нагрузки. Многие монтажники ВОК работали раньше на монтаже медных кабелей, которые имеют совершенно отличные механические характеристики. Динамическая усталость возникает при кратковременном приложении значительных растягивающих усилий. Это соответствует типичному сценарию, когда ВОК затягивается на место через кабелепровод или протягивается вдоль направляющих труб/лотков. Статическая усталость, наоборот, приобретает тогда, когда кабель длительное время находится под постоянной нагрузкой. Старение в отсутствие нагрузки относится к такому типу ухудшения прочности, который происходит в условиях отсутствия нагрузки на кабель, но под действием высокой окружающей температуры и влажности.

2.5.3. Волоконно-оптические модули

Задача, выполняемая волоконно-оптическими (или оптическими) модулями, — организовать жилы волокна так, чтобы упростить их

идентификацию и обработку, а также в том, чтобы структура такой организации сохранялась не только тогда, когда жилы волокна находятся в собранном ВОК, но и тогда, когда с кабеля снята наружная оболочка. Волоконно-оптический модуль, может быть оформлен в виде пучка волокон, ленты с волокнами или свободной трубки.

Волоконно-оптический модуль, как правило, объединяет 6-12 волокон свободно собранных вместе с помощью спиральной обвязки. Эта обвязка должна быть сделана так, чтобы она сохраняла свое положение в ВОК и облегчала идентификацию оптических модулей, когда оболочка ВОК снята. Один из методов организации жил волокна - формирование ленточной структуры. Такие волоконно-оптические ленты позволяют упаковывать в кабель до нескольких тысяч волокон. Однако, как правило, такие ленты содержат 4, 6, 8, 12 или 24 волокна, расположенных в виде линейного массива жил, образующего модуль.

Ленты с волокном собираются в матрицу для облегчения идентификации волокон, а также для придания прочности и улучшения защитных свойств. Материал таких матриц оптимизируется для улучшения надежности и рабочих характеристик. Этот материал должен быть совместим с внешним покрытием матриц, когда монтажники используют инструменты с тепловым методом зачистки волокна при удалении покрытия с волокна, и формирующем матрицу материалом, при сращивании, оконцовке или осуществлении других монтажных действий. Формирующий матрицу материал должен быть прозрачен настолько, чтобы можно было идентифицировать отдельную жилу волокна.

Волокна могут быть помещены также внутрь трубки, чтобы изолировать их от внешних механических напряжений. В трубку, как правило, помещают 6 или 12 волокон. Трубка должна также обеспечить легкость идентификации модулей в случае удаления внешней оболочки ВОК.

2.6. Волокно с выровненным или с профильным показателем преломления оболочки

В наиболее простой конструкции одномодового волокна его оболочка имеет выровненный (одинаковый) показатель преломления вдоль всего сечения оболочки. Такая конструкция волокна формирует плоский пьедестал *профиля показателя преломления* (ППП) вплоть до границы с сердцевинной. Это способствует единообразию характеристик волокон, что особенно важно, когда различные волокна должны быть объединены в одну существующую сеть. Волокно с плоским пьедесталом ППП обеспечивает, в принципе, несколько меньшее затухание и большее значение *диаметра поля моды* (области, занятой световым потоком одномодового волокна, диаметр которой больше физического диаметра сердцевинной), чем в случае использования конструкции волокна с профильным ППП.

Конструкции волокна с профильным ППП обычно получается при использовании метода внутреннего осаждения из паровой фазы или модифицированного метода химического осаждения из паровой фазы для получения оптического волокна. Показатель преломления называется профильным, потому что он не одинаков по сечению оболочки, а имеет профиль пьедестала, вдавленного в среднюю часть сечения оболочки. Вдавленный пьедестал говорит о том, что два показателя преломления не согласованы. Это происходит в том месте, где стеклянная трубка стыкуется с осаждаемым из паровой фазы стеклом. Сама вдавленность вызвана добавлением легирующих химических веществ в оболочку перед тем, как осуществить осаждение материала сердцевинной из паровой фазы.

Этот тип оболочки влияет на потери волокна при изгибе. Как мы упоминали выше, чем меньше диаметр поля моды, тем меньше потери при изгибе. Это справедливо для обоих типов указанных волокон, отличающихся ППП.

Однако, при одном и том же диаметре поля моды (MFD), внесенные (за

счет изгиба) потери больше для волокна с профильным показателем преломления, если диаметр изгиба больше 50 мм. Такие типы изгибов встречаются обычно в срезках монтажных шкафов и муфт и в кабелях. Следовательно, нужно ожидать, что стандартно изготовленное волокно с профильным показателем преломления оболочки имеет несколько меньший диаметр поля моды, при прочих равных условиях (достижения тех же показателей). Меньшие MFD проектируются в волокнах с профильным показателем преломления.

На рис. 2.8 (а) показан выровненный профиль показателя преломления оболочки, а на рис. 2.8(б) профиль с вдавленным пьедесталом [2.8].

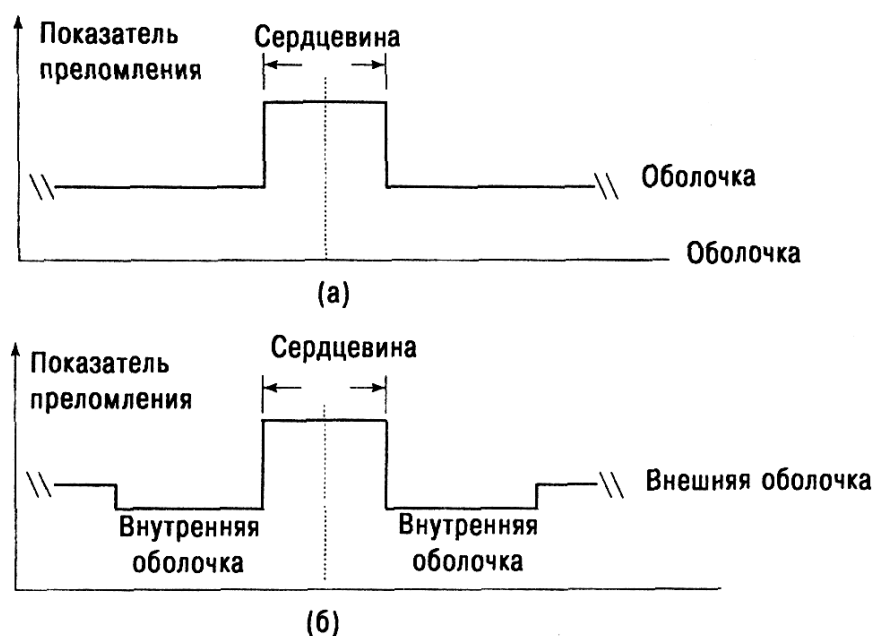


Рис. 2.8. (а) Выровненный профиль показателя преломления оболочки (с разрешения «Corning News & Views», [2, 8]). (б) Профиль показателя преломления с вдавленным пьедесталом (с разрешения «Corning News & Views», [2, 8]).

2.7. Типичные характеристики оптического волокна высокого качества

Компания Corning Fiber Systems выпустило волокно LEAF, имеющее большую эффективную активную площадь волокна. Оно является

идеальным для использования в широкополосных системах DWDM, работающих в окне прозрачности 1550 нм. В табл. 2.3 приведены оптические характеристики такого волокна, в табл. 2.4 приведены физические параметры этого же волокна, а в табл. 2.5 даны некоторые значения физических и механических параметров, полученные в результате тестирования.

Таблица 2.3

Оптические характеристики волокна LEAF компании Corning

| Характеристика/параметр | Значение | Комментарий |
|--|---|---|
| Ослабление при длине волны 1550 нм при длине волны 1625 нм | $\leq 0,25$ дБ/км $\leq 0,25$ дБ/км | |
| Точка разрыва непрерывности | не больше, чем 0,1 дБ при 1550 нм | |
| Затухание при длине волны 1383 нм | $\leq 1,0$ дБ/км | |
| Прирост затухания в диапазоне 1525-1575 нм | $\leq 0,05$ дБ/км | По отношению к длине волны 1550 нм |
| Прирост затухания за счет изгиба | $\leq 0,05$ дБ/км | На оправке диаметром 32 мм, 1 оборот, по отношению к 1550 и 1625 нм |
| Прирост затухания за счет изгиба | $\leq 0,50$ дБ/км | На оправке диаметром 75 мм, 100 оборотов, по отношению к 1550 и 1625 нм |
| Диаметр поля моды | 9,2-10,0 мкм при 1550 нм | |
| Полная дисперсия | 2,0-6,0 пс/нм/км | В диапазоне 1530-1565 нм |
| Поляризационная модовая дисперсия (PMD) | 4,5-11,2 пс/нм/км | В диапазоне 1565-1625 нм |
| Дисперсия PMD для протяженной линии | $\leq 0,08$ пс (км) ^{1/2} (см. Замечание) | |
| Максимальная PMD для отдельного волокна | $\leq 0,20$ пс (км) ^{1/2} | |

Замечание. Параметр *Дисперсия PMD для протяженной линии* (известный также как *Среднеквадратическое PMD линии*) используется для статистического описания PMD волокон в кабеле. Это значение используется для более точного определения статистической верхней границы PMD в ВОЛС.

Таблица 2.4

Физические размеры волокна LEAF

| Характеристика/параметр | Значение |
|---|-------------------------------|
| Стандартная длина | 4,4 - 25,2 км/катушку |
| Радиус собственной кривизны волокна | $\geq 4,0\text{м}$ |
| Диаметр оболочки | $125 \pm 1 \text{ мкм}$ |
| Неконцентричность сердцевины и оболочки | $\leq 0,5 \text{ мкм}$ |
| Некруглость оболочки | $\leq 1,0 \%$ (см. Замечание) |
| Диаметр покрытия | $245 \pm 5 \text{ мкм}$ |
| Неконцентричность покрытия и оболочки | $< 12,0 \text{ мкм}$ |

Замечание. Определяется как $[1 - (\text{минимальный диаметр оболочки}) / (\text{максимальный диаметр оболочки})] \times 100$

Таблица 2.5.

Значения физических и механических параметров

| Характеристика/параметр | Значение |
|---|---|
| Испытание: перемотка волокна, находящегося под действием растягивающей нагрузки | $> 0,7 \text{ ГН/м}^2$ (см. Замечание) |
| Эффективная площадь светового поля | 72 мкм^2 |
| Эффективный групповой показатель преломления (N_{eff}) | 1,469 при 1550нм |
| Коэффициент сопротивления динамической усталости (n_d) | 20 |
| Усилие снятия защитного покрытия, сухого | 3,0 Н |
| Усилие снятия защитного покрытия, мокрого, 14 дней при комнатной температуре | 3,0 Н |

Замечание. Возможно проведение испытаний и при больших значениях

ГЛАВА 3 ОПТИЧЕСКИЕ РАЗЪЕМЫ, СРОСТКИ И ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

3.1. Введение

Цель этой главы - описать различные пассивные устройства, используемые в волоконно-оптических сетях. Существует пять основных типов волоконно-оптических сетей. (Классификация автора отличается от общепринятой):

1. Глобальные сети (с большой длиной пролета) общего или частного пользования.
2. Офисные сети и сети масштаба предприятия, называемые также внутриобъектными сетями.
3. Местные распределительные сети, включающие сети кабельного телевидения (КТВ), в частности, сети, использующие гибридные (с медными и оптическими жилами) кабели.
4. Региональные сети (класса «Метро», MAN), осуществляющие передачу данных аналогично тому, как это делается в сетях масштаба предприятия: сети либо доставляют данные локально, либо передают потоки данных по всему региону.
5. Сети специального назначения, обычно передающие сигнал на очень короткие расстояния.

Каждый тип сети требует использования определенного числа как общих, так и специальных типов пассивных устройств. Например, кабельные телевизионные сети широко используют разветвители.

WDM/DWDM сети используют широкую номенклатуру специальных пассивных устройств. Мы опишем их в соответствующей главе о WDM (гл. 8).

В этой главе мы в первую очередь опишем волоконно-оптические

соединители (оптические разъемы) и неразъемные соединения (сростки). Также будут рассмотрены следующие пассивные устройства:

- оптические разветвители, расщепители сигнала (сплиттеры), элементы разветвления потока;
- оптические изоляторы;
- волоконно-оптические фильтры;
- оптические аттенюаторы;
- оптические (пассивные) коммутаторы;
- пассивные компенсаторы (хроматической) дисперсии;
- оконечные (терминирующие) элементы.

Каждое устройство, используемое в схеме передачи светового сигнала, является источником вносимых потерь. Оно также будет источником отражений, обычно характеризующихся потерями на отражение. Эти потери обычно измеряются в децибелах. За исключением аттенюаторов, хотелось бы иметь как можно более низкие вносимые потери и как можно более высокие потери на отражение (возвратные потери). Например, хочется иметь сростки с уровнем вносимых потерь меньше, чем 0,1 дБ, но с уровнем возвратных потерь больше, чем 40 дБ.

3.2. Основные определения

3.2.1. Элемент, ответвляющий поток (неселективный по отношению к длине волны)

Ответвителем является неселективный пассивный элемент, обладающий тремя или более портами и распределяющий мощность между ними в определенном соотношении без какого-либо усиления, переключения или какой-то модуляции.

3.2.2. Оптический разветвитель (сплиттер — комбайнер)

Термин *разветвитель* используется как синоним элемента ответвляющего потока. Он используется также для определения структуры, распределяющей оптическую мощность между двумя оптическими волокнами или между активным устройством и волокном.

3.2.3. Аттеньюатор

Аттеньюатор - пассивный элемент, осуществляющий управляемое ослабление сигнала в волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП).

3.2.4. Волоконно-оптический фильтр

Фильтр — пассивный элемент, используемый для модификации проходящего через него оптического излучения, как правило, за счет изменения спектрального распределения мощности. В частности, волоконно-оптические фильтры обычно используют для отсека или поглощения оптического излучения в определенных областях длин волн и пропускания излучения на других длинах волн.

3.2.5. Волоконно-оптический изолятор

Изолятор — оптическое устройство, не обладающее свойством взаимности, предназначенное для подавления обратного отражения в ВОЛП и имеющее минимальные вносимые потери в прямом направлении.

3.2.6. Волоконно-оптический терминатор

Терминатор (оконечный элемент) — элемент, используемый для терминирования оптоволокна (оконцованного или нет) с целью подавления отражения.

3.2.7. Волоконно-оптический переключатель (коммутатор)

Переключатель (коммутатор) — пассивный элемент, имеющий один

или больше портов, которые передают, блокируют или перенаправляют оптическую мощность в одно из волокон ВОЛП.

3.2.8. Пассивный компенсатор (хроматической) дисперсии

Компенсатор — пассивный элемент, используемый для компенсации хроматической дисперсии одного из оптических трактов.

3.2.9. Волоконно-оптический соединитель (оптический разъем)

Оптический разъем — элемент, прикрепленный к одному из оптических кабелей или отдельной части оборудования для осуществления частых соединений/разъединений оптических волокон или кабелей.

3.2.10. Сращивание оптических волокон

Сращивание — постоянное (неразъемное) или полупостоянное (разбираемое, с технологическим зазором) соединение между двумя оптическими волокнами, осуществляемое для объединения (в непрерывный канал передачи) их оптических потоков. Различают:

- *сварное соединение*: сращивание, при котором концы волокна соединяются в постоянное непрерывное соединение с помощью сварки;
- *механическое соединение*: сращивание, при котором концы волокна соединяются в постоянное (непрерывное или с технологическим зазором) соединение без помощи сварки.

3.3. Определение функциональных параметров

(За основу взят стандарт ITU-T G.671, Раздел 3.2)

3.3.1. Вносимые потери (IL)

Вносимые потери - уменьшение оптической мощности между входным и выходным портами пассивного элемента в дБ, определяемое как

$$IL = -10 \log(P_1 / P_0) \quad (3.1)$$

где P_0 — оптическая мощность, вводимая во входной порт, а P_1 — оптическая мощность, полученная из выходного порта.

Замечание 1. Для волоконно-оптического элемента ветвления они соответствуют элементу a_{ij} (где $i \neq j$) логарифмической матрицы передачи (см. 1.3.7 в IEC 875-1).

Замечание 2. Для устройства WDM они соответствуют элементу a_{ij} (где $i \neq j$) логарифмической матрицы передачи и должны быть определены для каждой рабочей длины волны.

Замечание 3. Для волоконно-оптического переключателя (коммутатора) они соответствуют элементу a_{ij} (где $i \neq j$) логарифмической матрицы передачи и зависят от состояния переключателя (коммутатора) (см. 1.3.9 в IEC 876-1).

Замечание 4. Для волоконно-оптического фильтра они должны быть определены для каждого рабочего диапазона длин волн.

Вносимые потери являются отношением оптической мощности, подаваемой на входной порт соответствующего оптического устройства, к оптической мощности, излучаемой из любого выходного порта, выраженной в дБ. Вносимые потери включают такие параметры, как потери на разветвление, в случае разветвителей, для других устройств ветвления мы используем понятие дополнительные потери. Эти потери являются наиболее полезными параметрами при проектировании систем. Максимальные и минимальные вносимые потери являются соответственно верхним и нижним пределами вносимых потерь рассматриваемого устройства и применяются во всем диапазоне длин волн, определенном для данного фильтра. Под типичными вносимыми потерями понимается ожидаемое значение вносимых потерь, измеренное для определенной центральной длины волны. Институт IEEE (см. [3.10]) определяет вносимые потери, как «полные потери оптической мощности, вызванные внесением/наличием такого оптического элемента, как оптический разъем, сросток или разветвитель».

3.3.2. Возвратные потери (RL)

Возвратные потери — часть входной мощности, которая возвращается из входного порта пассивного элемента. Они определяются, как

$$RL = -10 \log(P_r / P_i) \quad (3.2)$$

где P_i — оптическая мощность, вводимая во входной порт, а P_r — оптическая мощность, полученная обратно из того же порта.

Замечание. Для определенности, величина возвратных потерь для волоконно-оптических устройств не учитывает вклад от возвратных потерь оптических разъемов, этот вклад рассматривается отдельно. См. также Замечания к разделу 3.3.1.

3.3.3. Отражательная способность

Отражательная способность — отношение R отраженной мощности P_r к падающей мощности P_i , определенное для данного порта пассивного элемента при заданных условиях спектрального распределения, поляризации и геометрического распределения, выраженное в дБ, а именно:

$$R = -10 \log(P_r / P_i) \quad (3.3)$$

При рассмотрении мощности, отраженной от отдельного элемента, отражательная способность является более предпочтительным параметром по сравнению с возвратными потерями. Для определенности, величина отражательной способности волоконно-оптического устройства не включает вклад отражательной способности оптических разъемов, этот вклад рассматривается отдельно.

3.3.4. Предварительное обсуждение направленности, возвратных потерь и отражательной способности

Направленность - отношение оптической мощности, вводимой во входной порт, к оптической мощности, возвращаемой от любого другого порта. Направленность рассматривается как характеристика изоляции, или перекрестной помехи, на ближнем конце. Возвратные потери являются

отношением оптической мощности, вводимой во входной порт, к оптической мощности, которая возвращается из того же порта. Как направленность, так и возвратные потери, выражаются в дБ (они рассматриваются как положительные значения) и измеряются при условии оптического терминирования всех других портов. Отражательная способность фактически является возвратными потерями, взятыми с обратным знаком. Во многих случаях эти два понятия используются как синонимы. Минимальные направленность и возвратные потери являются теми нижними пределами, которые применяются во всем диапазоне длин волн, определенном для полосового фильтра.

3.3.5. Рабочий диапазон длин волн

Это диапазон длин волн от $\lambda_{i\min}$ до $\lambda_{i\max}$ в пределах, задаваемых от номинального λ_j , внутри которого пассивные элементы должны работать с определенными показателями ошибок.

Замечание 1. Для волоконно-оптических элементов ветвления, использующих более одного рабочего диапазона длин волн, соответствующие диапазоны длин волн не обязательно одинаковы.

Замечание 2. Элементы, такие как аттенюаторы, терминаторы, оптические разъемы и сростки, могут работать с определенными (или приемлемыми) показателями ошибок даже за пределами определенной для них области применения.

3.3.6. Потери, зависящие от поляризации (PDL)

Эти потери соответствуют максимальной вариации вносимых потерь, вызванной вариацией состояния поляризации, рассматриваемой на множестве всех возможных состояний поляризации.

3.3.7. Зависимость отражательной способности от поляризации

Эти потери соответствуют максимальной вариации отражательной

способности, вызванной вариацией состояния поляризации, рассматриваемой на множестве всех возможных состояний поляризации.

3.3.8. Обратные потери (степень изоляции) волоконно-оптических изоляторов

Обратные потери — мера уменьшения оптической мощности (в дБ), распространяющейся в обратном направлении, в результате установки изолятора. Излучающим портом здесь является выходной порт изолятора, а приемным портом - входной порт изолятора. Потери определяются следующей формулой:

$$BL = -10 \log(P_{ob} / P_{ib}) \quad (3.4)$$

где P_{ob} — оптическая мощность, измеренная на входном порте изолятора, когда мощность P_{ib} излучается в рабочий порт. При нормальной работе P_{ib} - оптическая мощность, отраженная от устройств, установленных на удаленном конце оптической линии, и направленная обратно так, что попадает в выходной порт изолятора, потери которого и измеряются.

3.3.9. Направленность

Для волоконно-оптических элементов ветвления, *направленность* представлена значением a_{ij} — элемента логарифмической матрицы передачи между двумя изолированными портами.

3.3.10. Однородность

Логарифмическая матрица передачи элементов ветвления может содержать определенный набор коэффициентов, который конечен и одинаков. В этом случае диапазон изменения этих коэффициентов a_{ij} (выраженный в дБ) именуется *однородностью* элементов ветвления.

3.3.11. Оптический порт

Портом является вход оптического волокна или оптического разъема

(присоединенного к оптическому элементу), используемый для ввода оптической мощности.

3.3.12. Матрица передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств

Оптические свойства волоконно-оптических устройств ветвления могут быть определены в терминах матрицы коэффициентов $n \times n$, где n - число портов, а коэффициенты представляют часть мощности, передаваемой между назначенными портами. В общем случае матрица передачи T имеет вид:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdot & t_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & t_{ij} & \cdot \\ t_{n1} & \cdot & \cdot & t_{nn} \end{bmatrix}$$

где t_{ij} - отношение оптической мощности P_{ij} , передаваемой из порта j , к оптической мощности P_i , подаваемой на порт i . То есть,

$$t_{ij} = P_{ij} / P_i$$

Замечание. В общем случае t_{ij} может зависеть от длины волны.

3.3.13. Коэффициент передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств

Коэффициентом передачи является элемент t_{ij} матрицы передачи.

3.3.14. Логарифмический коэффициент матрицы передачи волоконно-оптических устройств ветвления и WDM-устройств

В общем случае логарифмическая матрица передачи имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & a_{ij} & \cdot \\ a_{n1} & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix}$$

где a_{ij} — коэффициент уменьшения оптической мощности (в дБ), выходящей из порта j , при единичной мощности, приложенной к порту i , то есть,

$$a_{ij} = -10 \log(t_{ij})$$

где t_{ij} — коэффициент матрицы передачи (см. 1.3.6 в ИЕС 875-1).

3.3.15. Матрица передачи волоконно-оптических коммутаторов

Оптические свойства *волоконно-оптического коммутатора* могут быть определены матрицей коэффициентов $m \times n$ (где n — число портов). Матрица T отображает пути передачи в состоянии включено (передача в расчете на худший случай), а матрица T^0 — пути передачи в состоянии выключено (изоляция в расчете на худший случай) (см. 1.3.6 в ИЕС 876-1).

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdot & t_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & t_{ij} & \cdot \\ t_{n1} & \cdot & \cdot & t_{nn} \end{bmatrix}$$

$$T^0 = \begin{bmatrix} t_{11}^0 & t_{12}^0 & \cdot & t_{1n}^0 \\ t_{21}^0 & \cdot & \cdot & t_{2n}^0 \\ \cdot & \cdot & t_{ij}^0 & \cdot \\ t_{n1}^0 & \cdot & \cdot & t_{nn}^0 \end{bmatrix}$$

3.3.16. Коэффициенты передачи волоконно-оптических коммутаторов

Коэффициентом передачи является элемент t_{ij} или t_{ij}^0 матрицы передачи. Каждый коэффициент t_{ij} определяет минимальную (в расчете на худший случай) часть мощности, переданную от порта i к порту j , для любого состояния, при условии, что путь ij включен. Каждый коэффициент t_{ij}^0 определяет максимальную (в расчете на худший случай) часть мощности, переданную от порта i к порту j , для любого состояния, при условии, что путь ij выключен.

3.3.17. Логарифмическая матрица передачи волоконно-оптических коммутаторов

В общем случае логарифмическая матрица передачи имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & a_{ij} & \cdot \\ a_{n1} & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix}$$

где a_{ij} — коэффициент уменьшения оптической мощности (в дБ), выходящей из порта j , при единичной мощности, приложенной к порту i , то есть,

$$a_{ij} = -10 \log(t_{ij})$$

где t_{ij} — коэффициент матрицы передачи.

Аналогично, для состояния выключено, имеем $a_{ij}^0 = -10 \log(t_{ij}^0)$.

3.3.18. Избыточные потери волоконно-оптических устройств ветвления

Избыточные потери - это общая мощность, потерянная в устройствах ветвления, когда оптический сигнал подается в порт i . Они определяются как

$$EL_i = -10 \log \sum_j t_{ij}$$

где суммирование осуществляется только по тем значениям j , для которых i и j — проводящие порты. Для устройства ветвления с N входными портами будет существовать массив из N значений избыточных потерь, по одному значению для каждого входного порта i (см. 1.3.12 в ИЕС 875-1).

3.3.19. Коэффициент связи

Для заданного входного порта i коэффициент связи является отношением светового потока на заданном выходном порту k к общему световому потоку со всех выходных портов. Он определяется так:

$$CR_{ik} = t_{ik} / \sum_j t_{ij}$$

где индексом j обозначены все функционирующие выходные порты (см.

1.3.14 в IEC 875-1).

3.3.20. Рабочая длина волны

Это номинальная длина волны λ , на которой пассивный элемент должен (по проекту) работать с надлежащими показателями.

3.3.21. Матрица времен переключений волоконно-оптического коммутатора

Матрица S является матрицей таких коэффициентов, что каждый элемент s_{ij} характеризует максимальное время переключения, требуемое для того, чтобы перевести путь ij из любого состояния в состояние включено или выключено (см. 1.3.21 в IEC 876-1).

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdot & s_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & s_{ij} & \cdot \\ s_{n1} & \cdot & \cdot & s_{nn} \end{bmatrix}$$

3.4. Оптические разъемы и неразъемное соединение (сращивание) волокон

Оптические разъемы и неразъемное соединение (сращивание) волокон используются для соединения секций волокна (кабеля). Волоконно-оптический кабель (ВОК) доставляется производителю работ на катушках с намотанным кабелем длиной 1-25 км. Для систем дальней связи, в отличие от сетей в офисе клиента, катушки состоят из сегментов кабеля (строительных длин), которые должны быть соединены вместе для создания рабочей системы. Для этой цели используются либо оптические разъемы, либо сращивание волокон.

Промышленная практика диктует (в хорошем смысле) использование оптических разъемов на обоих концах кабеля и сращивание для промежу-

точных секций. Причины такой практики в следующем:

- Сростки дают вносимые потери минимально на уровне 0,04 дБ на один сросток, тогда как оптические разъемы имеют большие вносимые потери. Кроме того, сростки обеспечивают определенное постоянство.

- Это вынуждает использовать оптические разъемы в тех местах, где мы ожидаем несколько или много соединений/разъединений, например, в коммутационных панелях или соединительных кроссах. Многие оптические разъемы сделаны для осуществления легкого сочленения (соединения/разъединения).

Возможность использования оптических разъемов должно рассматриваться там, где волокно стыкуется либо с пассивным, либо с активным устройством. Если мы хотим заменить устройство, то это значительно удобнее сделать при наличии оптического разъема, чем сростка.

3.4.1. Оптические разъемы

На рынке существует большое количество специализированных оптических разъемов. Волоконно-оптические разъемы доступны в двух типоразмерах: разъемы стандартного размера и миниатюрные оптические разъемы. Существуют оптические разъемы, которые могут соединить как одно, так и несколько волокон.

Одни оптические разъемы могут быть спроектированы для соединений в полевых условиях, другие - для соединения в заводских условиях. К последним типам относятся оптические разъемы для соединительных шнуров (пигтейлов). Соединительный шнур — короткий по размеру одноволоконный кабель, присоединяемый обычно к устройствам типа: источник света или детектор светового сигнала. Другой конец такого шнура имеет оптический разъем, устанавливаемый производителем устройства. Если соединение производят в полевых условиях, необходимо предусмотреть ответную часть для такого типа разъема, установив ее на конце соединяемого волокна.

Оставшаяся часть материала главы будет сконцентрирована только на

оптических разъемах, устанавливаемых в полевых условиях.

3.4.2.1. Конструкция оптических разъемов — общий случай.

Оптический разъем состоит из трех основных частей:

1. Наконечник - ферул.
2. Соединительная розетка.
3. Стягивающая гайка.

Вид типичного оптического разъема в сборке приведен на рис. 3.1.

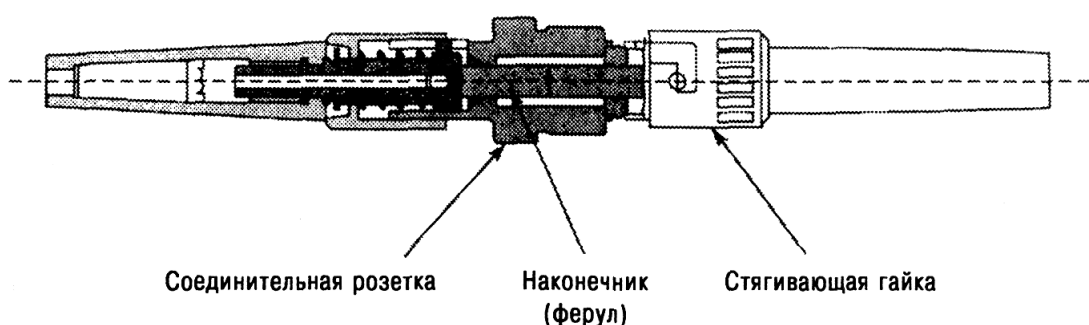


Рис. 3.1. Основная структура оптического разъема (с разрешения компании Tyco Electronics, Harrisburg, PA, [3.1]).

Обычно оптический разъем состоит из оболочки, внутри которой расположен керамический наконечник (ферул) с прецизионным продольным концентрическим каналом. Оголенный отрезок волокна вставляется в канал наконечника и удерживается резиной или термоплавким клеем. Выступающий конец волокна затем скалывается и полируется заподлицо (плоское зеркальное полирование). Металлическая оболочка выравнивается и соединяется встык с керамическим наконечником мягкой опрессовкой. Наиболее распространенный внешний диаметр наконечника — 2,5 мм, но в оптических разъемах с малым форм-фактором может использоваться наконечник диаметром 1,25 мм.

Для одномодового волокна точность выравнивания лучше, чем 0,1 мкм, а допуск на угловое выравнивание составляет 5°. Обычно рекомендуется контролировать вносимые потери установленного оптического разъема перед

тем, как отправить его потребителю. Эти потери должны быть измерены по стандартной технологии измерений, а не с помощью оптического временного рефлектометра (OTDR). Возможно при этом потребуется проконтролировать возвратные потери с учетом интерфейса оптического разъема. Это можно сделать с помощью OTDR. Цель последних измерений - убедиться, что возвратные потери имеют порядок 40 дБ или лучше [3.2].

На рынке существует большое разнообразие типов оптических разъемов, каждый из них требует своей собственной процедуры сборки. Однако, по крайней мере, два шага этой процедуры являются общими для них всех.

Во-первых, волокно закрепляется в оптическом разъеме с помощью эпоксидной смолы. Этот процесс важен с точки зрения обеспечения надежности оптического разъема. Эпоксидная смола минимизирует температурные перемещения волокна, позволяя осуществлять полировку торца без боязни повредить волокно, кроме того она предохраняет волокно от воздействия окружающей среды. И, наконец, она допускает очистку торцов от клея на последней стадии. Поэтому очень важно, чтобы эпоксидная смола присутствовала на всей длине отрезка голого волокна, вокруг буфера (там, где волокно входит в оптический разъем), а также вокруг кончика волокна, выступающего из наконечника (см. рис. 3.2).

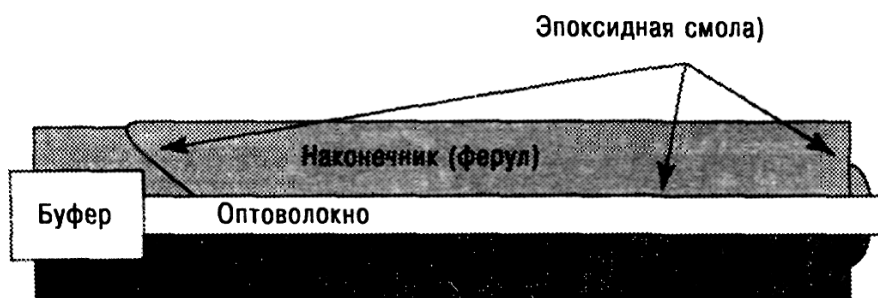


Рис. 3.2. Применение эпоксидной смолы (перепечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, [3.2], рис.7.4, с.7.4)

Во-вторых, оптоволоконный торец на конце оптического разъема должен быть отполирован. Рекомендуется полирование типа физический кон-

такт (PC). Это означает, что концы волокон будут физически соприкасаться внутри адаптера оптического разъема, как если бы они находились под давлением. Отсутствие полировки типа PC приводит к образованию воздушного зазора между волокнами и увеличению затухания. Описанное, показано на рис. 3.3.

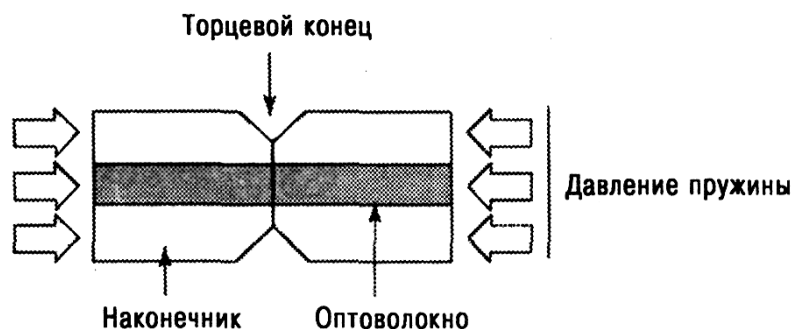


Рис. 3.3. Иллюстрация физического контакта (PC) в волоконно-оптическом разъеме (перепечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, [3.2], рис.7.5, с.7.5)

Существует несколько рекомендованных методов полирования, которые, как правило, зависят от материала наконечника. В общем случае, если материал наконечника очень твердый, например керамика, то, как правило, наконечник закруглен в районе торцевого конца и на него ссылаются как на предварительно закругленный. Мягкие материалы наконечника, такие, как композитные термопластики или стеклокерамика, могут полироваться плоско. Эти материалы изнашиваются примерно с такой же скоростью, что и оптоволокно, могут интенсивно полироваться и, тем не менее, поддерживать качество физического контакта.

Существуют несколько подходов в процессе подготовки волокна и оптического разъема к сборке. Торцевые концы волокна, которые оконцовываются оптическими разъемами, в настоящее время закругляются, вместо того, чтобы делать их плоскими и перпендикулярными. Преимущество такого подхода в том, что свет не отражается непосредственно назад к источнику (так как угол отражения равен углу

падения). Теперь он отражается назад под углом и, как правило, оказывается потерян для волокна. *Радиальная полировка* сначала отсекает часть отраженного света, а затем направляет то, что отразилось, так, что оно никогда не достигает исходного источника излучения. Этот подход называется полировкой торца до уровня физического контакта. Другое преимущество подхода, использующего полировку закругленного конца до уровня физического контакта, в том, что волокна касаются наиболее выступающими точками, которые приходятся на среднюю часть светонесущей сердцевины. Пользователь убежден, что волокна касаются всегда и что воздушный зазор исключен [3.3].

Обратное отражение может быть снижено еще больше, если использовать *угловой физический контакт (APC)*. Угловой контакт отражает свет в оболочку волокна, а не в сердцевину.

Возвратные потери оптического разъема должны быть, по крайней мере, 40 дБ. Другой важный параметр — *число сочленений*. Оно относится к числу соединений/разъединений, начиная с которого характеристики разъема станут ухудшаться. Это число, как показывает опыт, колеблется от 200 до 600 сочленений.

3.4.1.2. Типы оптических разъемов

Оптический разъем типа ST. Этот тип разъема использует быстро сочленяемое байонетное соединение, которое требует повернуть разъем только на четверть оборота для осуществления соединения/разъединения. Встроенный ключ обеспечивает хорошую повторяемость параметров соединения, потому что разъем будет всегда одинаково сочленен с соединительной втулкой. Разъем типа ST в настоящее время заменяется на более прогрессивный разъем типа SC. Уровень вносимых потерь разъема типа ST составляет 0,5 дБ.

Оптический разъем типа SC. Этот тип разъема широко используется как для одномодового, так и для многомодового волокна. Сокращение SC

расшифровывается как «оптический разъем пользователя». Оно пришло из используемых ранее пользовательских приложений.

Разъем SC относится к классу разъемов общего пользования и применяется как в сетях с большой длиной секций, так и в сетях с внутриобъектовой прокладкой. Он использует «пушпульный» механизм сочленения. Разъем SC базового типа состоит из сборки (вилки), содержащей наконечник. Эта сборка вставляется в оболочку разъема, центрирующую наконечник. Одно из преимуществ разъема типа SC в том, что он может объединяться в секцию, состоящую из нескольких разъемов. В этом случае секция может использоваться для дуплексного соединения (одно волокно которого используется для передачи в прямом, а другое в обратном направлениях). Разъем имеет ключ, для предотвращения неправильного соединения. Вносимые потери такого разъема составляют 0,4 дБ и ниже.

Оптический разъем типа FC. Этот тип разъема был первоначально разработан в Японии компанией Nippon Telegraph and Telephone Company. Он широко используется для одномодового волокна и имеет уровень вносимых потерь порядка 0,4 дБ.

Разъем типа FC имеет средства для настройки. Ключ настройки позволяет подстроить уровень вносимых потерь до нескольких десятых дБ. После того, как позиция минимальных потерь найдена, ключ может быть зафиксирован. Разъем типа FC выпускается как для одномодового, так и для многомодового волокон.

Оптический разъем типа D4. Этот тип разъема особенно широко используется для одномодового волокна. Он во многих отношениях похож на разъем FC, но имеет наконечник меньшего диаметра — 2,0 мм. Вносимые потери разъема D4 составляют около 0,4 дБ.

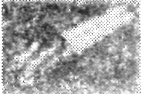



Оптический разъем типа 568SC. Этот тип разъема обычно используется для внутриобъектовой прокладки. Его параметры соответствуют стандарту EIA/TIA-568, регламентирующему прокладку кабельных линий связи в коммерческих зданиях. По сути он представляет

собой дуплексный вариант разъема типа SC. Разъем типа 568SC имеет механизм защелки, который позволяет осуществить сочленение легче, чем байонетный разъем типа SC. Кроме того, этот разъем имеет адаптер, который допускает использование как симплексного, так и дуплексного разъемов для организации симплексного или дуплексного соединений. Ожидаемый уровень вносимых потерь разъема 568SC составляет порядка 0,3 дБ.

Оптический разъем типа FDDI. Этот тип разъема в принципе спроектирован как двухканальное устройство, использует два керамических наконечника и механизм боковых защелок. Прочный кожух защищает наконечники от случайных повреждений, тогда как плавающий стык обеспечивает ему плотное сочленение без усилий. Различные типы ключей могут быть использованы в этом типе разъема, для того чтобы удовлетворить различным требованиям технологии FDDI. Ожидаемый уровень вносимых потерь составляет порядка 0,3 дБ для одномодовых приложений и порядка 0,5 дБ для многомодовых приложений. Разъемы типа FDDI могут использоваться и для других приложений. Напомним, что FDDI - технология локальных сетей, используемая для пакетной передачи данных со скоростью 100 Мбит/с (125 Мбод) в соответствии со стандартом ANSI.

Миниатюрные разъемы. Миниатюрные разъемы, называемые также разъемами с малым форм-фактором, имеют размеры примерно в два раза меньшие, чем их обычные стандартные варианты (например, SC, FC, ST), т.е. диаметр наконечника составляет 1,25 мм, а не 2,5 мм, что позволяет реализовать большую плотность упаковки на коммутационной панели и плотную схему упаковки на стойке. В табл. 3.1 приведены основные параметры четырех наиболее известных миниатюрных разъемов.

Сравнение параметров миниатюрных разъемов четырех типов.

| | LC  | MT-RJ  | SC-DC  | VF-45  |
|--------------------------------|---|--|---|--|
| Расстояние между волокнами, мм | 6,25 | 0,75 | 0,75 | 4,5 |
| Число стержней | 2 | 1 | 1 | 0 |
| Материал стержня | керамика | пластмасса | пластмасса | — |
| Выравнивание | отверстие наконечник | и центровочный штырь и наконечник | направляющая и наконечник | V-образная канавка |
| Размер стержня, мм | $\phi 1,25$ | 2,5×4,4 | $\phi 2,5$ | — |
| Трансивер, проход | 11,1 мм | 7,2 мм | 11 мм | 12,1 мм |
| ширина, мм | 5,7 | 5,7 | 7,5 | 8 |
| длина, мм | 14,6 | 14 | 12,7 | 21 |
| Тип кабеля | дуплексный | дуплексный/ленточный | дуплексный/ленточный | GGP, покрытый полимером |
| Область вилки | заливка и полировка | предварительно полированный выступ | предварительно полированный выступ | — |
| Область розетки | вилка+разветвитель | вилка+разветвитель и розетка | Вилка+разветвитель | скол и полированная розетка |
| Защелка | 2 типа RJ, связанные сверху | типа RJ — наверху | типа SC - пушпульные | типа RJ - наверху |

Замечание. Вносимые потери этих оптических разъемов изменяются в диапазоне от 0,3 до 0,6 дБ.

Источник. Performance Comparison of Small Form Factor Fiber-Optic Connectors. Jean Trewilla, IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, [3.12], с.1 (с разрешения корпорации IBM).

3.4.2. Неразъемное соединение волокон

Неразъемное соединение, или *сросток*, постоянно соединяет два волокна. Существуют два типа соединений (сростков):

1. Механическое соединение.

2. Сварное соединение.

Самое важное в процедуре формирования неразъемного соединения (или сращивания) — точно выровнять концы двух волокон перед их соединением. Хорошая полировка концов волокон и их очистка также важны при совершении этой процедуры.

3.4.2.1. Механическое соединение

Механическое соединение — небольшой участок механически соединенного оптоволокна — *сросток* длиной 6 см и диаметром 1 см. Этот сросток осуществлен путем точного выравнивания двух концов волокон и их надежного постоянного механического соединения. Сросток закреплен с помощью быстросхватывающего покрытия или клеевой обвязки, или с использованием того и другого. Механические сростки допустимы как для организации постоянного, так и временного соединения. Вносимые потери за счет механического соединения обычно выше, чем сварного соединения, и имеют порядок 0,1 — 0,8 дБ.

Одномодовое волокно, учитывая небольшой размер его сердечника и, следовательно, малый диаметр поля моды, более чувствительно к ошибкам выравнивания волокна в месте сращивания. Следовательно, устройства механического сращивания, способные обеспечить достижение приемлемых вносимых потерь в бюджет потерь одномодового волокна, стоят дороже, требуют больше времени для сращивания и могут потребовать затрат на капиталовложения, сравнимых с теми, что используются для сварки.

3.4.2.2. Соединение с помощью сварки

Сварное соединение наиболее широко используется для постоянного соединения одномодового волокна. Получение хорошего сварного сростка значительно проще сейчас, учитывая постоянный прогресс сварочного оборудования, процедур и практики сварки, в дополнение к постоянному улучшению контроля за геометрией волокна в процессе производства. В

результате, типичный диапазон достигаемых вносимых потерь составляет 0,04 - 0,1 дБ как для одномодовых, так и многомодовых волокон.

Качество сварного соединения. Два параметра влияют на качество сварного соединения: вносимые потери сростка и прочность на растяжение. Для многомодового волокна, существуют факторы, зависящие от самого волокна, они включают несовпадение диаметров волокон, несовпадение числовых апертур, несовпадение показателей преломления и ошибки concentричности сердцевины и оболочки. Concentричность показывает, насколько точно круг сердцевины вписывается в кольцо окружающей ее оболочки, т.е. какова величина смещения центров обеих окружностей. Этот тип потерь может быть уменьшен путем использования техники сращивания, дающей возможность выровнять положение сердцевины волокон в месте соединения. Из рис. 3.4 можно оценить основные теоретические потери на сращивание, вызванные их основными причинами: несовпадением диаметров волокон и числовых апертур.

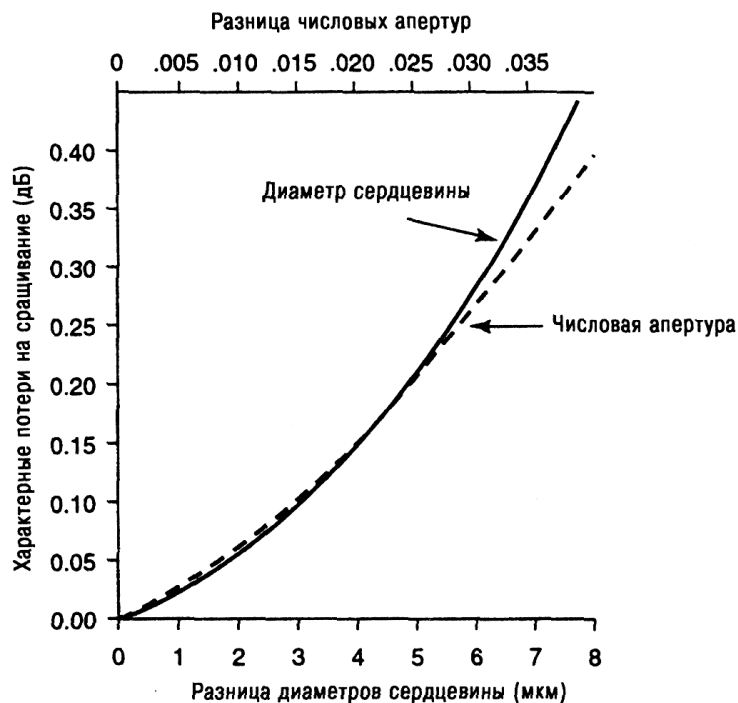


Рис. 3.4. Характерные потери на сращивание, вызванные несовпадением диаметров волокон и числовых апертур. (Перепечатано с разрешения компании Corning, Inc., AN103, [3.4], рис. 1)

Следует отметить, что *потери на сращивание* являются направленными, по отношению к этим переменным (т.е. потери имеют место только, если оптический поток распространяется через срасток в направлении принимающего волокна, имеющего меньшие диаметр и апертуру). Потери на сращивание являются аддитивными, т.е. если сращиваются два многомодовых волокна, демонстрирующие несовпадение как в диаметрах сердцевины, так и в числовых апертурах, то их вклад в эти характерные потери является суммой этих двух потерь.

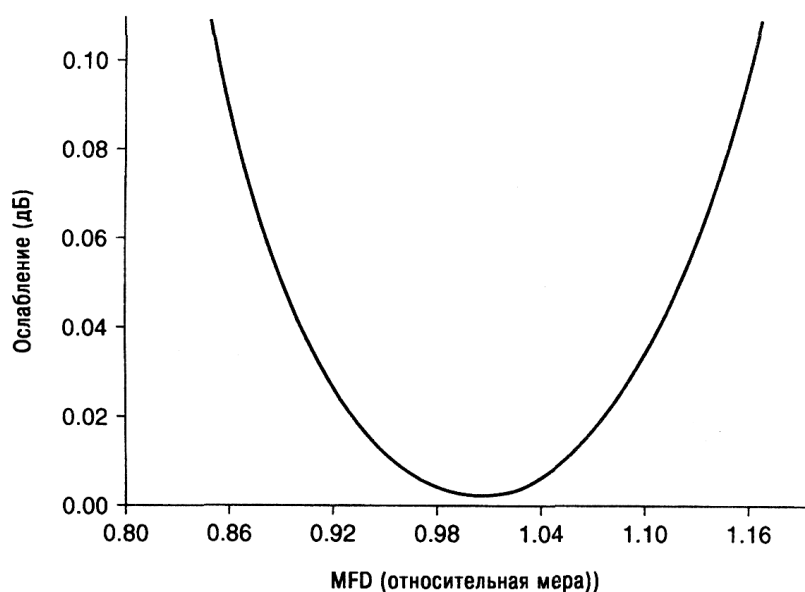


Рис. 3.5. Характерные потери на сращивание для одномодового волокна, вызванные несовпадением диаметров поля моды. (Перепечатано с разрешения компании Corning, Inc., AN103, [3.4], рис. 2, с. 3)

Как видно из рис. 3.5, фактические потери на сращивание (среднее от потерь по двум направлениям) оказываются практически ненаправленными. Другими словами, потери, зависящие от параметров волокна и рассматриваемые в плане распространения света через срасток, не зависят от того с какой стороны срастка распространяется световой поток). Нужно иметь в виду, что эти потери достаточно малы для тех допусков на несовпадение MFD, которые декларируют производители. Например, эти потери можно оценить в худшем случае на уровне 0,04 дБ дополнительных потерь для во-

локна, имеющего MFD, равный $9,3 \pm 0,5$ мкм, в соответствии со спецификацией. Существуют и другие дополнительные факторы, влияющие на механическое сращивание. Они включают расщепление концов волокна, загибание волокна на конце и отражение Френеля.

В случае одномодовых волокон без сдвига дисперсии доминирующим фактором является несовпадение *диаметров поля моды* (MFD) волокон. На рис. 3.5 можно оценить вклад в этот вид потерь за счет несовпадения MFD.

Существуют также факторы, сопутствующие процессу сращивания. Они привносятся методами и процедурами сращивания. К ним относятся продольные и угловые смещения, загрязнение и деформация сердечника. Их влияние может быть сведено до минимума за счет использования опытных техников, оборудования для автоматического выравнивания волокна и нескольких циклов плавления при работе на более современном оборудовании.

Подготовка оптического кабеля для сращивания включает следующие этапы: зачистку волокна, очистку поверхности и формирование концевой угла волокна.

Оболочку волокна можно удалить различными способами, например, химически путем, использованием оборудования термической или механической зачистки. Для типичного акрилатного покрытия волокна, компания Corning рекомендует механическую зачистку, как наиболее надежную, быструю, дешевую и создающую четко определенные условия терминирования оболочки.

Очистка поверхности — очень важный этап. Любые остатки акрилатного покрытия после зачистки оболочки должны быть удалены с поверхности зачищенного участка волокна. Необходимо избегать любых операций по ручной обработке указанного участка волокна до тех пор, пока процесс сварки не будет окончательно завершен. Это позволит минимизировать шанс загрязнения волокна пылью или жирными пятнами с рук, которые могут вызвать дополнительные потери сраста и уменьшение

его прочности на растяжение.

Один из основных моментов, влияющих на качество сростка при одном цикле плавления, является *концевой угол*. Поэтому надлежащее формирование концевого угла является одним из основных шагов в получении приемлемого сростка. Требования к концевому углу волокна могут меняться от пользователя к пользователю и от типа используемого скальвателя. В общем случае, однако, концевые углы волокна меньше, чем два градуса, обычно приводят к приемлемым сварным сросткам. Можно ожидать, что хорошие типы скальвателей позволяют получить конечные углы волокна величиной в половину градуса.

Выравнивание волокна. Существуют блоки ручного и автоматического выравнивания волокна при сварке. Сначала оператор помещает очищенные и сколотые волокна в блоки выравнивания и/или другие механизмы фиксации волокна в устройстве сращивания. После этого волокна выравниваются визуально путем перемещения их в направлении координат X-Y. Визуальное выравнивание требует поддержания минимального возможного зазора между волокнами, чтобы уменьшить видимые ошибки, которые возможны при ручном выравнивании краев волокон, проводимом при увеличении.

В случае автоматического выравнивания, начальное выравнивание состоит лишь в помещении концов волокон в зажимы V-образных канавок. Блок выравнивания сам выравнивает волокна.

Существует пять возможных альтернатив для окончательного выравнивания сердцевины волокон:

1. Мониторинг мощности (светового потока), используя источник и приемник света.
2. Использование для такого мониторинга оптического рефлектометра (OTDR).
3. Использование техники локального ввода и обнаружения (LID) (светового излучения).
4. Использование техники выравнивания профилей.

5. Пассивное выравнивание V-образных канавок.

Техника мониторинга мощности потока основана на оптимальном выравнивании волокон по уровню мощности, переданной через точку срачивания. Источник света при этом подсоединяется к входному концу одного из волокон, подлежащему сварке. Световой сигнал проходит через контакт волокон и его уровень считывается на измерителе мощности, подсоединенном к выходному концу. Выравнивание достигается перемещением волокон в направлении X-Y до тех пор, пока не будет достигнут максимум считываемой мощности. При этом способе выравнивания требуются два человека. Один — считывает показания приемника, тогда как другой (на некотором удалении от него) — оперирует с волокнами, подлежащими сварке. Этот метод дает возможность улучшить визуальное выравнивание, так как позволяет оптимально выровнять сердцевины волокон, а не оболочки.

В методе, описанном выше, вместо измерителя мощности может быть использован оптический рефлектометр (OTDR). Следует заметить, что выравнивание с использованием OTDR, зависит от возможности обеспечить в реальном времени отображение уровня мощности для осуществления ее оптимизации.

Многие устройства срачивания используют *систему локального ввода и обнаружения* светового излучения (LID). Это еще одна система выравнивания по уровню мощности, но сформированная на месте сварки. Она исключает необходимость удаленного (на определенное расстояние) мониторинга уровня мощности. В этой системе волокна, расположенные по обе стороны от точки сварки, загораются вокруг цилиндрических оправок, которые достаточно малы, чтобы позволить осуществить ввод (в точку входа) и вывод (в точке выхода) светового излучения через оболочку волокон.

Системы выравнивания профиля формируют изображение места сварки, чтобы дать возможность техникам надлежащим образом выровнять два волокна для сварки. Коллимированный пучок направляется под прямым углом к оси свариваемых волокон в место сварки. Это создает образ волокна,

которое должно быть выровнено. Один из специальных типов устройств выравнивания создает сгенерированный компьютером образ центральной линии сердечников, к которому компьютер и приводит два волокна перед тем, как осуществить сварку.

Другая система выравнивания профиля выполняет процедуру выравнивания, используя профиль оболочки волокна. Нужно иметь в виду, что качество выравнивания при этом во многом зависит от концентричности системы сердечник-оболочка. При использовании пассивного выравнивания V-образных канавок само выравнивание волокна является результатом точного соответствия V-образных канавок, диаметра оболочки волокна и концентричности системы сердцевины-оболочки.

Процедура сварки. Процесс сварки использует электрическую дугу для разогрева и сваривания. Некоторые техники используют один или несколько коротких включений тока дуги для того, чтобы удалить любые возможные загрязнения из волокна в месте сварки перед началом сварки.

Следующим шагом является предварительная сварка. Этот процесс состоит в нагревании волокна для размягчения его соединяемых концов. Предварительная сварка осуществляется для того, чтобы концы волокна были при температуре, оптимальной в процессе последнего шага сварки, что дает возможность материалу волокон течь навстречу друг друга вплоть до момента физического контакта. Если температура на стадии предварительной сварки слишком велика, то может возникнуть излишняя деформация концов волокон, что в свою очередь приведет к изменению геометрии стекла. Если же эта температура слишком мала, то может возникнуть механическая деформация концов волокон. В этом случае может произойти выпучивание волокна в тот момент, когда на последней стадии сварки на концы волокон будут действовать силы, стягивающие их.

Оптимальная подготовка к сращиванию включает установку тока дуги и ее длительности, установку длины зазора и перекрытия шагов предварительной и окончательной сварки. Эти установки должны быть определены

(экспериментально) на основании результатов последовательности сварок. Качество сварки включает два основных параметра, как это отмечалось выше, а именно: прочность волокна на растяжение и потери, вносимые в месте сварки. Некоторые устройства сращивания имеют возможность осуществлять тесты на растяжение. Опытные техники знают, как осуществить такое испытание вручную, чтобы простыми средствами оценить прочность на растяжение.

Потери на сращивание могут быть проконтролированы с помощью удаленного OTDR или измерителя мощности аналогично тому, как это делалось выше для выравнивания волокна. Точные измерения потерь срезка с помощью OTDR требуют усредненных двунаправленных измерений. (Раздел 3.4.2.2 основан на документе компании Corning - AN 103 (6/99) [3.4])

3.5. Волоконно-оптические элементы ветвления потока, или разветвители

3.5.1. Введение

Элементы ветвления потока либо разделяют световой поток на несколько путей (направлений), либо, наоборот, соединяют несколько световых потоков в один путь (направление). Некоторые из этих устройств, которые выполняют эту функцию, называют *разветвителями* (couplers). Ниже перечислены различные типы таких устройств и кратко описаны выполняемые ими функции.

Комбайнер (combiner) — устройство, обычно имеющее один выходной порт и два или больше входных портов. Он может быть использован для осуществления как однонаправленных, так и двунаправленных операций.

Сплиттер (splitter) - устройство, имеющее обычно один входной порт и несколько выходных портов. Он может быть использован для двунаправленной передачи или для распределения потока на два или большее число

устройств или конечных пользователей.

Древовидный разветвитель (tree coupler) — устройство, принимающее поток (сигнал) на один вход и распределяющее его несколько выходов и наоборот. Как правило оно используется для распределения сигнала от одного источника ко многим пользователям.

Звездообразный разветвитель (star coupler) - многопортовое устройство, имеющее, по крайней мере, два входных порта и два или более выходных портов. Оно может распределять или объединять сигналы с множества входных портов в один выходной порт, или принимать световой сигнал и распределять его на множество выходных портов.

Широкополосный разветвитель (или же разветвитель, нечувствительный к длине волны) — устройство, работающее в двух окнах прозрачности: 1310 и 1550 нм. Соответственно все аналогичные элементы ветвления должны иметь возможность работать в этих двух окнах. Другая желаемая особенность таких элементов ветвления — быть невосприимчивым к изменению рабочих длин волн внутри одного окна. Другими словами, вносимые потери должны быть одинаковы для любой длины волны в одном из окон.

Разветвитель доступа, или ответвитель (tap) — трех или четырехпортовое устройство ответвления для облегчения осуществления функций ввода-вывода обычно с малым уровнем оптической мощности. Его коэффициент ответвления в высшей степени неоднороден. Этот тип устройств может быть использован в гибридных (медь-волокно — HFC) кабельных сетях, для мониторинга статуса линии и для мультиплексоров ввода вывода.

Мультиплексоры-демультиплексоры с разделением по длине волны — устройства ветвления формально ничем не отличающиеся от разветвителей. Эти устройства распределяют световой сигнал в зависимости от длины волны. Мультиплексор используется для передачи нескольких световых сигналов (каждый на своей длине волны) по одному волокну.

Демультимплексор принимает агрегированный световой сигнал, распространяющийся по одному волокну и разделяет его на несколько компонентов в зависимости от длины волны так, что каждая компонента направляется в отдельное волокно.

Компоненты ветвления светового потока находят широкое применение в локальных сетях, где средой передачи является оптоволокно. Разветвители обеспечивают двунаправленную передачу между магистральным ВОК и станцией ЛВС. Разветвители нашли также применение в широкополосных беспроводных радиосетях, называемых *локальными системами многоточечного распределения (LMDS)*. В этих сетях они подключают оптоволоконную магистраль к узлу LMDS, который содержит мультиплексор ввода-вывода, устройство управления доступом и радиотерминалы. Разветвители также широко используются в оптических коммутаторах.

3.5.2. Концепции разветвителей/элементов ветвления

Рассмотрим рис. 3.6. Он показывает, что может произойти, если мы поместим два отрезка оптоволокну, контактирующих бок о бок, в открытый огонь и превратим их *сплавной разветвитель с биконической отводами*. Внутри каждого волокна существует длинная секция ответвлений, затем однородная секция длины Z , где они сплавляются (свариваются), а затем еще одна секция ответвлений, с направленным обратно по отношению к первой, кросс-соединением двух отдельных волокон.

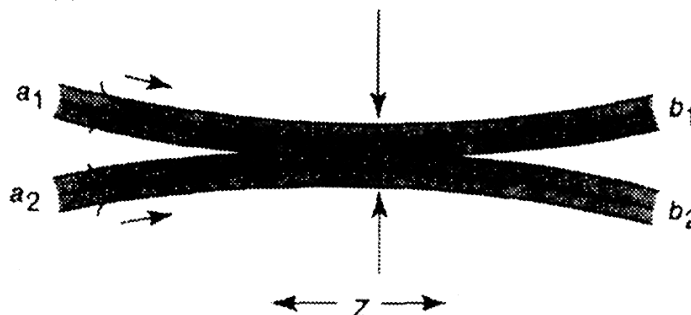


Рис. 3.6. Схематичное изображение сплавного биконического разветвителя.

Обратите внимание, что в области связи длиной Z сердцевины сжаты и поле «выдавливается в воздушную оболочку».

Эти ответвления достаточно плавные, так что только незначительная часть энергии падающая из любого порта, расположенного слева, отражается назад в любой из портов, расположенных справа. По этой причине указанные устройства часто называют *направленными разветвителями*.

Используя эту технологию, можно сделать ряд разветвителей, основанных на том, что уровень мощности, перешедшей из одного волокна в другое, может быть изменен путем изменения следующих параметров: Z — длины области связи, через которую осуществляется взаимодействие двух полей; a — радиуса сердцевин в области связи; Δa — разности радиусов сердцевин в области связи. Созданные на базе этой концепции различные типы разветвителей будут описаны ниже.

Моды низкого порядка продолжают существовать в исходном волокне до тех пор, пока угол падения остается больше *критического угла*. На выходе оболочечные моды конвертируются обратно в *моды сердцевин*. При этом коэффициент разветвления определяется длиной разветвителя (в нашем случае — Z , см. рис. 3.6) и толщиной оболочки.

Типичный вариант разветвления мощности в этом случае может быть 50:50, когда одна половина мощности идет на один выходной порт, а другая — на другой. При первом (грубом) варианте анализа выходной мощности разветвителя дает следующее. Допустим, что уровень мощности входного сигнала равен —10 дБм, тогда на каждом из выходов мы, казалось бы, должны получить уровень —13 дБм, что выглядит логично. Однако мы забыли про вносимые потери. Это те внутренние потери, которые вносит сам разветвитель за счет рассеивания мощности внутри него самого. Типичное значение таких потерь — 0,7 дБ. Следовательно, уровень мощности на выходах разветвителя составит —13,7 дБм. Этот тип разветвителя мощности является частью основного класса разветвителей, базирующихся на концепции *сплавного разветвителя с биконическими отводами*, описанного выше. Многие типы разветвителей могут быть сделаны на основе такого разветвителя, как разветвитель мощности, показанный на рис. 3.7: комбайнеры, Y-переходы,

звездообразные разветвители, направленные разветвители и т.д.

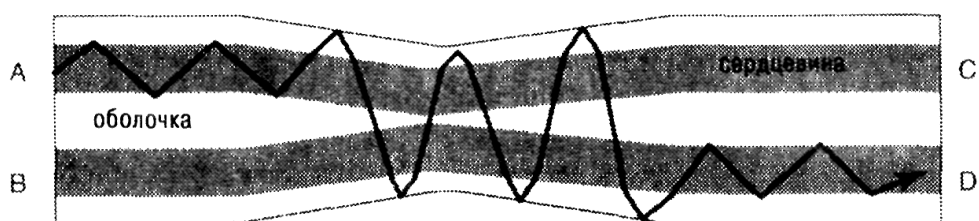


Рис. 3.7. Разветвитель на основе многомодового волокна. (С разрешения компании *Australien Photonics CRC*, взято из Интернет, [3.5])

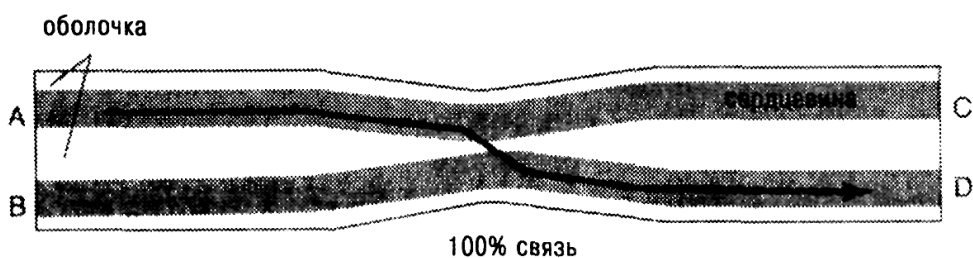


Рис. 3.8. Оптический разветвитель на основе одномодового волокна. (С разрешения компании *Australien Photonics CRC*, взято из Интернет, [3.5])

На рис. 3.8 показан разветвитель, который работает с одномодовым волокном, но является зависимым от используемой длины волны. Когда два разветвителя в варианте с биконическими отводами находятся в тесном контакте друг с другом, как на рис. 3.8, возникает резонансное явление. Световой поток волокна А захватывается сердечником волокна В. Уровень мощности, переданный в волокна В и А, зависит от длины области связи. Световой поток из волокна А может быть захвачен на 100%, т.е. полностью перейдет в волокно В на определенной длине, называемой длиной области связи, или на длине нечетно кратной ей. Длина области связи изменяется в зависимости от длины волны света в волокне. Величина коэффициента разветвления при этом может быть настроена путем выбора нужной длины области связи.

Важным является следствие того факта, что длина области связи зависит от длины волны света в одномодовом разветвителе. Предположим,

что мы передаем по волокну две длины волны: 1300 и 1550 нм. Требуемая длина области связи, для длины волны 1550 нм, больше, чем для длины волны 1300 нм. Это приводит к тому, что свет с длиной волны в 1300 нм полностью (100%) перейдет в сердцевину волокна В из А, а затем вернется из В в сердцевину волокна А. Свет длины волны 1550 нм также полностью (100%) перейдет в сердцевину волокна В из А. Тщательно выбирая длину области связи, можно добиться объединения или разделения двух длин волн. Эта концепция иллюстрируется рис. 3.9.

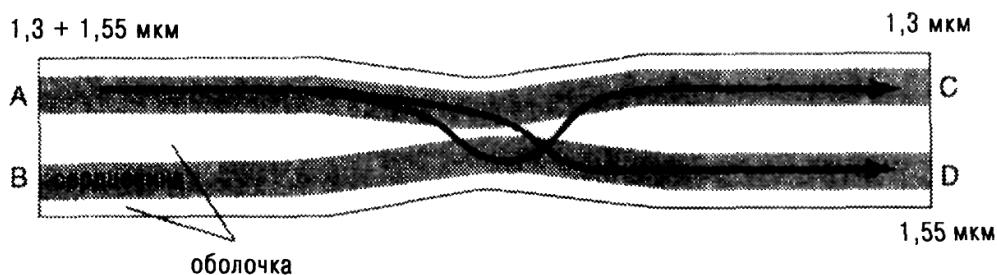


Рис. 3.9. Разветвитель на основе одномодового волокна, показан процесс разделения длин волн. (С разрешения компании Australian Photonics CRC, взято из Интернет [3.5])



Рис. 3.10. Y-переход или разветвитель 1×2. (С разрешения компании Australian Photonics CRC, взято из Интернет [3.5])

На рис. 3.10 показан разветвитель, работающий как Y-переход, или разветвитель мощности 1x2. В этом случае, в идеале, световой поток разделяется поровну между двумя выходными плечами. Y-переходы трудно осуществить путем сращивания трех волокон, и, к тому же, полученное устройство будет иметь большие потери. Более практично было бы создать

оптические волноводы со стеклянной подложкой.

Y-переходы можно состыковывать для создания разветвителей 1x4 или 1x8, как показано на рис. 3.11.

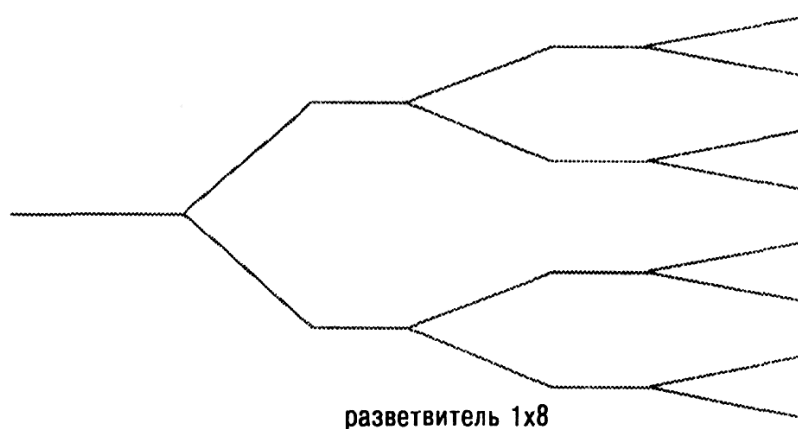


Рис. 3.11. Стыковка Y-переходов друг с другом. (С разрешения компании *Australien Photonics CRC*, взято из Интернет [3.5])

3.5.3. Рабочие параметры разветвителей/элементов ветвления

В табл. 3.2 приведены функциональные параметры передачи для волоконно-оптических разветвителей, или элементов ветвления.

Таблица 3.2

Параметры передачи для разветвителей/элементов ветвления^{а)}

| Параметры | Все сети | |
|---|---------------------|-------------|
| | Максимум | Минимум |
| Вносимые потери (дБ) | $4,0 \log_2 n$ | неприменимо |
| Оптическое отражение (дБ) | -40 | неприменимо |
| Диапазон рабочих длин волн (нм) ^{б)} | 1580/1360 | 1480/1260 |
| Потери, зависящие от поляризации (Д дБ) | $0,1(1 + \log_2 n)$ | неприменимо |
| Направленность (дБ) | неприменимо | 50 |
| Однородность (дБ) | $1,0 \log_2 n$ | неприменимо |

^{а)} Заметим, что устройства $2 \times n$ для $2 \leq n \leq 32$ находятся в стадии разработки.

^{б)} Предполагается работа в одной или в обеих полосах пропускания; однако, если существует некая длина волны, выходящая за границу полосы пропускания, то значения таких параметров, как потери, применимо для нее только в этой ограниченной полосе.

Источник. Табл. 6.2, с. 11, стандарт ITU-T G.671 [3.8]

3.5.4. Основные определения разветвителей/элементов ветвления

Коэффициент разветвления. Коэффициент разветвления (coupling ratio), или коэффициент расщепления (splitting ratio), определяется как отношение оптической мощности, излучаемой одним выходным портом, к сумме оптических мощностей, излучаемых всеми выходными портами. Коэффициент разветвления измеряется на определенной центральной длине волны. Многомодовые разветвители измеряются с равновесным модовым заполнением.

Центральная длина волны и полоса пропускания. Показатели всех разветвителей меняются в зависимости от длины волны. Спецификация разветвителей обычно распространяется на все окно прозрачности или, в некоторых случаях, на несколько окон. Центральная длина волны является лишь номинальной рабочей длиной волны разветвителя, тогда как полоса частот является диапазоном длин волн, в рамках которого эта спецификация гарантируется.

Критерий выбора полосы пропускания, рекомендуемый компанией Telcordia [3.9], состоит в следующем.

Для не-WDM приложений, работающих в диапазонах 1310/1550 нм и с WDM-элементами ветвления, для всех цифровых приложений, кроме SONET с длинными секциями, должны выполняться следующие требования по ширине обоих рабочих полос в длинноволновой области:

1260 - 1360 нм и 1480 - 1580 нм

Для приложений WDM и SONET с длинными секциями рекомендуемые полосы следующие:

1280 - 1335 нм и 1525 - 1575 нм

Для DWDM рекомендуемые полосы следующие:

1285 - 1325 нм и 1530 - 1566 нм

Для гибридных систем, использующих модуляцию АМ-ЧПБП (с частично подавленной боковой полосой), рекомендуемые полосы следующие:

1290 - 1330 нм и 1530 - 1570 нм

Следует заметить, что разработчики оптоволоконных элементов рекламируют в настоящее время различные устройства, частотный диапазон которых простирается много дальше 1600 нм.

Вносимые потери. Определения и обсуждение потерь см. раздел 3.3.1.

Типичные избыточные потери. Избыточные потери - это отношение оптической мощности, поступающей на входной порт разветвителя, к общей мощности на выходе любого выходного порта, выраженное в дБ. Типичные избыточные потери - это ожидаемое значение избыточных потерь, измеренное на определенной центральной длине волны. Для многомодовых разветвителей измерения проводятся с равновесным модовым наполнением, (*Равновесное модовое наполнение* — это условие, накладываемое на многомодовый оптический волновод, при котором распределение относительной мощности (т.е. наполнение) направляемых мод не зависит от длины волновода [3.10]. Синоним: состояние устойчивого равновесия), (EMF).

Избыточные вносимые потери. В оптическом волноводном разветвителе избыточные вносимые потери - это оптические потери, ассоциируемые с той порцией света, которая не излучается из номинально функционирующих портов данного устройства [3.10].

Однородность. Однородность является мерой того, насколько выходная мощность равномерно распределена между выходными портами разветвителя. Понятие однородности применяется к разветвителям с номинально равными коэффициентами разветвления и определяется как разность между максимальными и минимальными вносимыми потерями, оцененная на множестве всех выходных портов рассматриваемого разветвителя и выраженная в дБ. Однородность задается типовым значением для полосы пропускания в целом. Дополнительные рассуждения относительно однородности приведены в разд. 3.3.9.

Telcordia (см. [3.9]) определяет однородность ΔL как максимальную вариацию вносимых потерь между одним входным портом i и любыми двумя

выходными портами j и k , или между входными портами j и k и одним выходным портом i .

Элементы ветвления, которые предполагается использовать в цифровых системах, работающих на скоростях до 10 Гбит/с, должны иметь следующую однородность:

$$\Delta L \leq 0,8 \log_2 N$$

где N — число портов разветвителя.

Для систем АМ-ЧПБП однородность определяется так:

$$\Delta L \leq 0,5 \log_2 N$$

Однородность особенно важна для систем DWDM и АМ-ЧПБП.

Направленность, возвратные потери, отражательная способность. Направленность является отношением оптической мощности, поступающей на входной порт, к оптической мощности, возвращенной с любого другого входного порта. Направленность понимается как степень изоляции на ближнем конце, или перекрестная помеха на ближнем конце. Возвратные потери являются отношением оптической мощности, поступающей на входной порт, к оптической мощности, возвращенной с того же входного порта. Как направленность, так и возвратные потери, выражаются в дБ (положительные значения) и измеряются при условии, что все выходные порты оптически терминированы (заглушены). Отражательная способность численно равна возвратным потерям, но имеет противоположный знак. Во многих случаях отражательная способность и возвратные потери используются как синонимы. Минимальные значения направленности и возвратных потерь являются теми нижними пределами, которые распространяются на весь диапазон длин волн, определенный в полосе пропускания. Дополнительные рассуждения относительно отражательной способности приведены в разд. 3.3.3.

3.5.5. Звездообразные и направленные разветвители/элементы ветвления — дополнительное обсуждение

Звездообразные разветвители имеют больше четырех портов. Существуют два типа таких разветвителей: звездообразный разветвитель передающего типа и звездообразный разветвитель отражающего типа. Звездообразный разветвитель передающего типа показан на рис. 3.12.

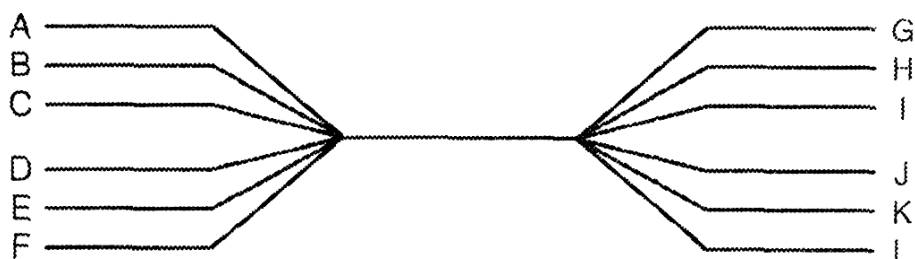


Рис. 3.12. Звездообразный разветвитель передающего типа. (С разрешения компании Australian Photonics CRC, взято с сайта в Интернете [3.5])

Световой поток, поступающий на один из входных портов звездообразного разветвителя передающего типа, разветвляется на все выходные порты равномерно. Например, на рис. 3.12, свет, поступающий на входной порт E, разветвляется на выходные порты G, H, I, J, K и L.

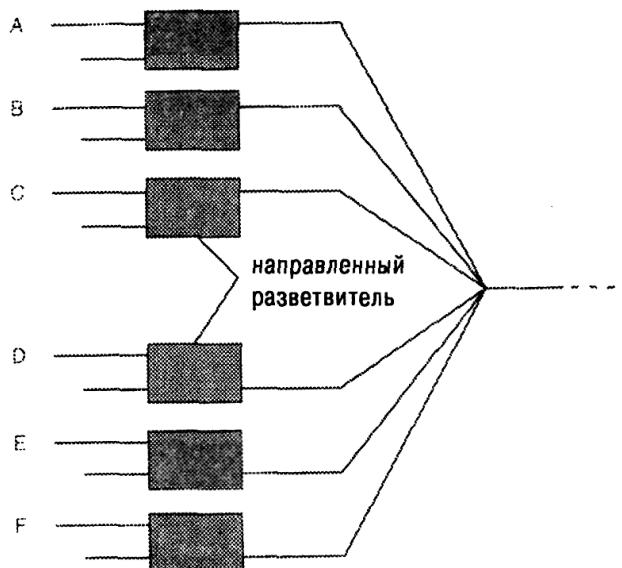


Рис. 3.13. Звездообразный разветвитель отражающего типа. Напоминает архитектуру звезды пассивной ЛВС (С разрешения компании Australian Photonics CRC, взято с сайта в Интернете [3.5])

Существуют направленные ответвители с топологией дерева и ветви с коэффициентом расщепления $1 \times N$, 2×2 . Направленность достигается с одним основным портом ввода-вывода и двумя ответвленными портами ввода-вывода. Основное волокно (ствол дерева) может передавать оптическую мощность в двух направлениях. Ответвленные порты при этом являются однонаправленными — оптическая мощность направляется в них к основному или от основного волокна. На рис. 3.13. показан звездообразный разветвитель отражающего типа.

3.6. Оптические аттенюаторы

Аттенюатор — устройство, которое уменьшает интенсивность светового сигнала, прошедшего через него. Аттенюаторы часто используются в качестве звена в схеме после лазерного передатчика, чтобы согласовать его выходную мощность с уровнем, требуемым следующими за ним в этой схеме устройствами, такими как усилители EDFA (см. гл. 7). Нужно тщательно выбирать тип аттенюаторов так, чтобы они имели отличные параметры возвратных потерь (их уровень д. б. > 40 дБ), чтобы быть уверенным, что уровень света, отражаемого обратно в направлении передатчика, будет очень низок.

Другими ключевыми параметрами аттенюаторов являются:

- стабильность;
- надежность;
- оптические возвратные потери (ORL);
- потери, зависящие от поляризации (PDL);
- точность;
- повторяемость;
- вносимые потери;
- поляризационная модовая дисперсия (PMD).

Одно из наиболее простых применений — короткие оптоволоконные секции, где уровень интенсивности света настолько высок, что выходит за границы динамического диапазона детектора света (приемника). В такой схеме можно поставить аттенюатор, для уменьшения интенсивности света до уровня, соответствующего динамическому диапазону используемого приемника.

Другим примером является применение аттенюатора в системах WDM, где мощность каждого канала подстраивается так, чтобы обеспечить плоскую спектральную характеристику светового сигнала, поступающего на первый в линии усилитель EDFA. Следовательно, плоская спектральная характеристика в пределах ширины полосы канала также является ключевым параметром аттенюатора [3.7].

Существуют оптические аттенюаторы с переменным (VOA) и фиксированным коэффициентом ослабления, иногда называемые *демпфирующими прокладками*.

3.6.1. Основные рабочие параметры аттенюаторов

Допуск на вносимые потери должен быть не больше, чем $\pm 15\%$. Для аттенюаторов с фиксированным коэффициентом ослабления обычно используется следующий ряд коэффициентов ослабления (вносимых потерь): 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 дБ. Значение оптической отражательной способности должно, максимально, быть на уровне —40 дБ. Диапазон рабочих длин волн аттенюаторов должен составлять, максимально, от 1360 до 1580 нм, минимально — от 1260 до 1480 нм. Типичная ширина полосы рабочих длин волн составляет 1310-1580 нм. Уровень потерь аттенюаторов, зависящий от поляризации (PMD), не должен быть выше 0,3 дБ.

3.7. Изоляторы

Изоляторы — устройства, для которых потери света малы при распространении в одном направлении и велики в противоположном направлении. Изоляторы обычно устанавливают в выходных схемах устройств с высоким уровнем интенсивности света, таких как передатчики на лазерных диодах и усилители EDFA. Их функция — уменьшить уровень сигнала, отраженного назад в используемый лазерный диод или усилитель EDFA.

Характеристики изолятора определяются следующими критическими параметрами:

- спектральной зависимостью, особенно для так называемых узкополосных изоляторов, которые проектируются для работы в спектральном диапазоне уже, чем 20 нм. Изоляторы описываются пиком ослабления обратного излучения и шириной полосы, лежащей в области 3 дБ ослабления уровня изоляции от максимума этого пика.

- малым уровнем вносимых потерь, <1 дБ в прямом направлении, и большим уровнем потерь в обратном направлении: больше 35 дБ (при одноступенчатой изоляции) и 60 дБ (при двухступенчатой изоляции), и слабой зависимостью от поляризации.

- поляризационной модовой дисперсией (PMD). Изоляторы обычно проектируются на основе использования элементов с высоким уровнем двойного лучепреломления, а они весьма склонны к высокому уровню PMD (типичное значение — 50-100 фс, $1\text{фс} = 10^{-15}\text{ с}$), в особенности для одноступенчатого изолятора. Двухступенчатые изоляторы могут быть спроектированы так, что PMD, вносимая первой ступенью, во многом компенсируется второй ступенью.

- потерями, зависящими от поляризации (PDL). Они ухудшают характеристики оптического изолятора.

В общем случае при проектировании изоляторов используют *эффект*

Фарадея. Он управляет вращением плоскости поляризации оптического луча в присутствии магнитного поля. Это вращение происходит в том же направлении, что и направление распространения света, параллельно или антипараллельно направлению магнитного поля. Оптический изолятор состоит из цилиндрического стержня из материала с эффектом Фарадея, такого как железиттриевый гранат (YIG), длина которого выбирается так, чтобы обеспечить вращение на 45° . Этот цилиндрический стержень помещается между двумя поляризаторами, чьи оси скрещены на 45° относительно друг друга. Свет, распространяющийся в одном направлении, проходит через второй поляризатор благодаря эффекту Фарадея. В отличие от этого, свет, распространяющийся в противоположном направлении, блокируется первым поляризатором [3.6]. Уровень изоляции должен быть больше, чем 30 дБ. Отражательная способность оптического изолятора должна быть на уровне 40 дБ и выше.

3.8. Волоконно-оптические фильтры

Оптические фильтры используют механизм селекции длин волн и могут быть грубо разделены на две большие категории в зависимости от того, какой физический механизм положен в их основу: оптической интерференции или дифракции. Существуют фильтры, рассчитанные на выделение фиксированной длины волны, и настраиваемые фильтры. Для настраиваемых фильтров желательно иметь следующие свойства:

- широкий диапазон настройки для максимизации числа каналов, которые могут быть выбраны;
- незначительные перекрестные помехи, чтобы избежать помех от соседних каналов;
- быстрая настройка для минимизации времени доступа;
- малые вносимые потери.

Фильтры выполняют исключительно важную роль в оборудовании WDM/ DWDM на стороне демультиплексора. Стандарт ITU-T G.671 [3.8] рекомендует следующие значения параметров фильтров:

Вносимые потери: максимум 1,5 дБ в полосе пропускания;

Вносимые потери: минимум 40 дБ в полосе задерживания;

Оптическая отражательная способность: —40 дБ.

Дополнительное обсуждение оптических фильтров см. в гл. 8.

3.9. Оптические кроссы, коммутационные панели и оптические коммутаторы

Коммутационные панели как устройства чрезвычайно просты. Это пассивные панели, которые имеют набор адаптеров (розеток), для соединения с помощью кабелей и их разъединения. Большинство коммутационных панелей допускает возможность подсоединения кабелей с двух сторон, что позволяет достичь большей гибкости при реконфигурации оптических кабелей. Другие коммутационные панели обеспечивают управление кабельным хозяйством, так чтобы сохранить в должном порядке вариант маршрутизации и расположение кабелей.

Коммутационные панели используются также как схемы точек доступа для тестирования и поиска неисправностей. Они используются для реконфигурации оборудования. Если, например, оборудование, или устройство, вышло из строя, то надлежащим образом сконмутированная панель позволяет персоналу легко перенаправить поток с пострадавшего соединения на резервное или на другое оборудование.

Распределительные блоки и шкафы аналогичны коммутационным панелям и отличаются только тем, что имеют дополнительное пространство и позволяют организовать раскладку волокна. Всегда рекомендуется оставлять некоторый технологический запас волокна. Этот запас может

пригодиться, если придется изменить схему соединения. Распределительные блоки обеспечивают место для хранения этого запаса волокна в виде достаточно большой бухты кабеля.

Кроссы, или *кросс-соединители*//*кросс-коммутаторы*, существуют в нескольких модификациях. Некоторые техники и полевые инженеры используют термин *кросс* как синоним коммутационной панели, в которой все операции осуществляются вручную. Мы определим кросс как синоним переключателя световой волны (то есть как синоним *кросс-коммутатора*).

Основная цель кросс-коммутатора в сети — реорганизовать звенья связи. Они выполняют изменение маршрута сигнала и используются для конфигурации маршрута или восстановления звена связи. Эти коммутаторы автоматически работают в оптической области, будучи сконфигурированы какими-то управляющими воздействиями. Они используются также в оптических мультиплексорах ввода-вывода. Кроме того они могут быть использованы в оптических маршрутизаторах, осуществляющих маршрутизацию в зависимости от длины волны. Ключевыми параметрами, определяющими показатели коммутаторов и, следовательно, их пригодность для тех или иных приложений, являются:

- вносимые потери и потери на разветвление;
- возвратные потери;
- потери, зависящие от поляризации;
- перекрестные помехи и уровень изоляции;
- надежность;
- время переключения;
- стабильность;
- степень сложности.

В табл. 3.3 перечислены значения параметров передачи для оптических коммутаторов, они взяты из стандарта ITU-T G.671.

Оптическая коммутация рассмотрена более подробно в гл. 17.

Параметры передачи, рекомендуемые для оптических коммутаторов.

| Параметры | Переключатели типа $1 \times n$ ^{a)} | | Переключатели типа 2×2 | |
|--------------------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|--------------|
| | Максимум | Минимум | Среднее | Стандартное |
| Вносимые потери, дБ | $2,5/\log_2 n$ | не применимо | изучается | не применимо |
| Отражательная способность, дБ | -40 | не применимо | -40 | не применимо |
| Рабочий диапазон волн, нм | изучается | изучается | изучается | изучается |
| Потери, зависящие от поляризации, дБ | изучается// $0,1(1 + \log_2 n)$ | не применимо | изучается | не применимо |
| Время переключения, мс | 20//10 | не применимо | изучается | не применимо |
| Повторяемость, дБ | 0,25 | не применимо | изучается | не применимо |
| Однородность, дБ | изучается// $0,4 \log_2 n$ | не применимо | изучается | не применимо |
| Переходные помехи, дБ | не применимо | Изучается ^{b)} | изучается | не применимо |
| Направленность, дБ | не применимо | 50 | изучается | не применимо |

^{a)} Двойные значения (a//b) приведены: a — для медленных коммутаторов, b — для быстрых коммутаторов

^{b)} Рассматривается величина 25 дБ, решение зависит от согласованного определения перекрестной помехи.

Источник. Раздел 6.7, Стандарта ITU-T G.671 [3.8].

ГЛАВА 4 ИСТОЧНИКИ СВЕТА

4.1. Введение

Возвращаясь к рис. 1.1, видим, что линия волоконно-оптической связи состоит из источника света, или передатчика (данная глава), объединенного с детектором света, или приемником (гл. 5), секциями оптоволоконного кабеля (гл. 2), соединенными с помощью оптических разъемов и сростков (гл. 3). Главы 1-5 закладывают основу всему остальному материалу книги.

Современные источники света, или передатчики, состоят из интегральных схем и лазерных диодов (ЛД) или светоизлучающих диодов (СИД). Их излучение модулируется с помощью отдельных интегральных схем, которые в настоящее время в большинстве своем заменили используемые раньше оптические передатчики, собранные из дискретных электрических компонентов и электрооптических устройств. Сегодня на сцену вышли СБИС, чтобы удовлетворить еще более высоким скоростям и повысить надежность. На рис. 4.1 приведена упрощенная блок-схема волоконно-оптического передатчика.

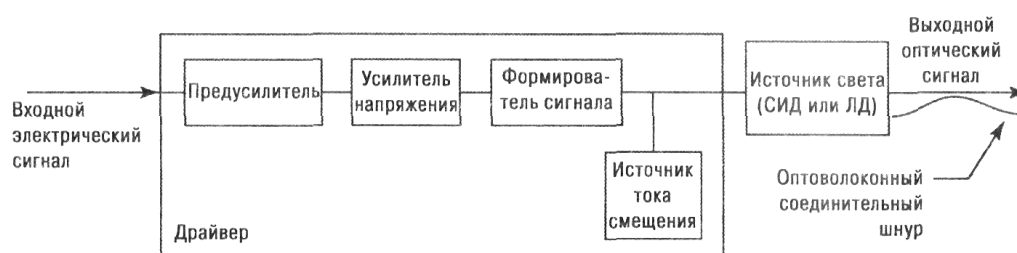


Рис. 4.1. Упрощенная блок-схема волоконно-оптического передатчика.

Существуют два основных типа источников света, применяемых в ВОСП: СИД и ЛД. В этой главе мы рассмотрим их как отдельные элементы, понимая, однако, что они, фактически, формируют узлы описанных выше интегральных схем. Мы также обсудим новый тип источника — VCSEL —

лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью.

4.2. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающие диоды — СИДы, используемые в связи, излучают свет в ближней ИК области. Они недороги, по сравнению с большинством лазеров. Первоначально СИДы использовались с многомодовым волокном, учитывая, что они излучали свет в широком конусе, который мог быть захвачен эффективно только многомодовым волокном, имеющим большую числовую апертуру.

Как описано у Агравала в [4.1], СИД в самом простейшем случае является диодом с p - n гомопереходом, смещенным в прямом направлении. Рекомбинация пар электрон-дырка в обедненной зоне генерирует свет. Часть его выходит из диода и может быть собрана и направлена в оптоволокно. Излучаемый свет некогерентен, имеет достаточно широкий спектр (30-60 нм) и излучается в конусе под относительно большим углом.

Структура СИДа может быть классифицирована как структура с *излучающей поверхностью* или с *излучающим срезом*, в зависимости от того, излучает ли СИД свет из поверхности, параллельной плоскости перехода, или из среза области перехода. На рис. 4.2 показана конструкция этих двух типов СИДа. Оба типа могут быть сформированы путем использования либо p - n гомоперехода, либо гетероструктуры, в которой активная область окружена слоями подложки p - и n -типов. Диод на основе гетероструктуры обладает лучшими характеристиками. Он обеспечивает управление во всей области эмиссии и позволяет устранить внутреннюю абсорбцию, благодаря прозрачности слоев подложки. Такой СИД очень неэффективен. Даже при надлежащем проектировании, поверхностно излучающий диод может собрать в оптоволокно не более 1% генерируемой внутри мощности.

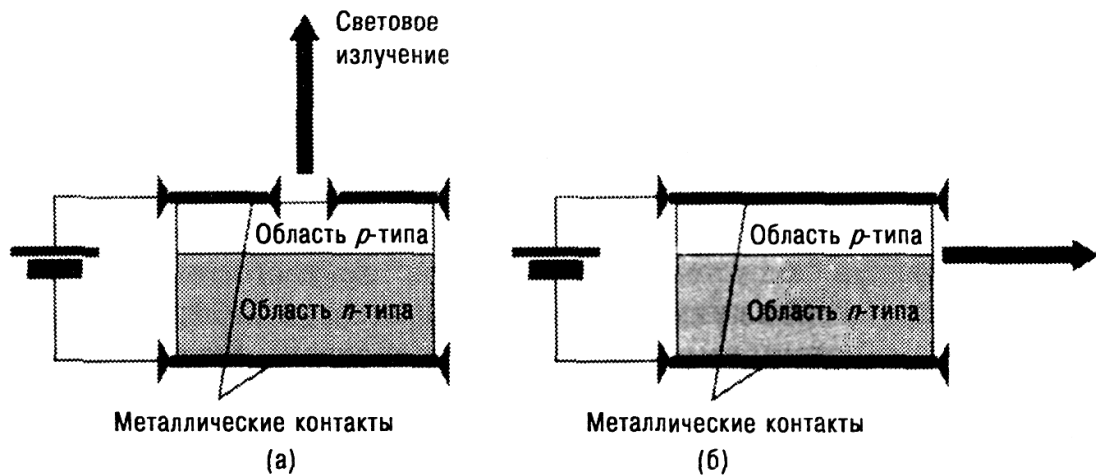


Рис. 4.2. Поперечный разрез СИДа с излучающей поверхностью (а) и СИДа с излучающим срезом (б)

4.3. Лазерные диоды

Если системные требования не так строги, то в качестве источника света обычно выбирается СИД. Лазерные диоды обычно используются для линий связи большой длины или при большой скорости передачи (выше 155 Мбит/с). Существует несколько типов ЛД (все моды, рассмотренные ниже, продольные — LM):

- многомодовые (MLM) или с резонаторами Фабри—Перо;
- одномодовые (SLM);
- одномодовые с распределенной обратной связью (DFB), часто называемые DFB-лазерами;
- DFB-лазеры с внешним модулятором;
- лазеры с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL).

Типы лазеров приведены в порядке их разработки, в этом же порядке они будут рассмотрены ниже.

4.3.1. Многомодовые (MLM) лазеры, или лазеры с резонаторами Фабри—Перо

Многомодовые лазеры, или лазеры с резонатором Фабри-Перо, излучают несколько мод, спектр которых приведен на рис. 4.3. Картина спектра демонстрирует наличие доминантной моды желаемой длины волны и боковые моды меньшей амплитуды, отделенные промежутками шириной примерно в 1 нм. При модуляции излучения лазера модулируется не только основная мода, но и, точно также, боковые моды. Полная ширина спектра оптического излучения такого лазерного источника на уровне половины от максимума (FWHM) при наличии модуляции равна 4-5 нм.

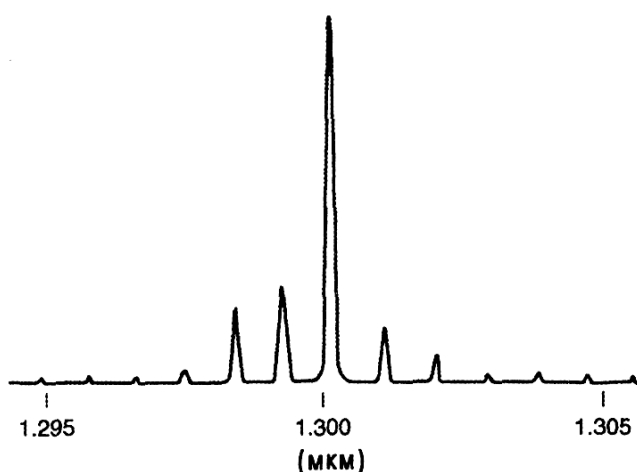


Рис. 4.3. Спектр многомодовых лазеров, или лазеров с резонатором Фабри-Перо

Более тщательное изучение спектра лазера показывает, что несмотря на относительную стабильность полной выходной мощности, мощность каждой отдельной моды может значительно изменяться. Это явление, известное как *распределение мощности по модам*, имеет важное практическое значение. Когда лазерный сигнал передается по волокну, то, с учетом групповой задержки (*хроматической дисперсии*), зависящей от длины волны, распределение мощности по модам приводит к возрастанию уровня шума в выходном сигнале. В результате в характеристике системы появляется не зависящий от мощности нижний уровень ошибок, который нельзя снизить

путем выделения дополнительной мощности в бюджете системы. Для систем, работающих со скоростями передачи данных большими, чем несколько сотен Мбит/с, на волокне с малыми потерями, это явление может стать основным фактором, ограничивающим длину пролета секции. Более того, даже небольшие отражения (обратно в сторону лазера) от внешних поверхностей оптического разъема, могут вызвать значительные изменения в «поведении» при распределении мощности по модам, а значит и в характеристиках самой системы.

Замечено, что имеется конечная вероятность того, что уровень четных мод, составляющих, в среднем, несколько процентов от общей мощности, может достичь больше половины общей мощности. В этом смысле было бы правильным определить *эффективную ширину спектра лазера*, как спектральный диапазон, в пределах которого моды, в среднем, могут переносить 1 или больше процентов общей мощности [4.2].

4.3.2. Одномодовые (SLM) лазеры

SLM-лазеры сконструированы так, что потери в резонаторе различны для его различных продольных мод, в противоположность тому, что имеет место для MLM, потери которых независимы от мод. В MLM-лазере продольная мода с минимальными резонаторными потерями достигает порога первой и становится доминантной модой. Другие соседние моды при этом дискриминируются, благодаря их более высоким потерям, которые удерживают нарастание мощности от спонтанного излучения. В этом случае мощность, переносимая этими «вторичными» модами, обычно низкого уровня, меньше 1% полной излучаемой мощности. Если SLM-лазер настроен правильно, то можно ожидать, что первая боковая мода по крайней мере на 30 дБ ниже, чем доминантная мода.

4.3.3. Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (DFB)

Структура DFB-лазера имеет встроенные возможности выбора длины волны благодаря механизму обратной связи. Обратная связь не локализована в одном месте, а распределена по длине резонаторной полости. Этот тип лазера содержит периодические дифракционные решетки между двумя слоями лазерной структуры (обычно между интерфейсной *n-InP* подложкой и *n-InGaAsP* слоями) для создания обратной связи на фиксированной длине волны, которая определяется шагом дифракционной решетки. Это соответствует периодическому изменению показателя преломления моды.

DFB-лазер очень чувствителен к оптической обратной связи, в особенности от оптических разъемов, которые служат интерфейсами между лазером и волокном основной линии связи. Даже относительно небольшая обратная связь (уровнем меньше, чем 0,1%, например, [4.1]) может дестабилизировать лазер и повлиять на характеристики системы. Так, например, если ширина линии увеличивается, то может произойти скачкообразное изменение моды и увеличение *шума относительной интенсивности* (RIN) - шума, генерируемого DFB-лазером). Можно предпринять ряд шагов, чтобы уменьшить интенсивность обратной связи или ослабить эффект от ее влияния. Один из таких шагов - использовать антиотражающие покрытия. Обратную связь можно также уменьшить путем скалывания кончика волокна под небольшим углом (см. гл. 3), так чтобы отраженный свет не попал на активную область такого лазера. Еще один, более радикальный, шаг состоит в том, чтобы установить изолятор (см. гл. 3) между лазером и интерфейсом оптического разъема.

Важным параметром DFB-лазера является *коэффициент подавления моды* (MSR). При проектировании таких типов полупроводниковых лазеров основная цель состоит в ослаблении побочных продольных мод и получении максимально возможной мощности доминантной моды (см. рис. 4.3). Можно ожидать значение MSR на уровне > 30 дБ для DFB-лазера непрерывного

излучения. Наш интерес здесь в том, чтобы передать световой сигнал лазером с одиночной и узкой спектральной линией (т.е. с доминантной модой). При идеальных условиях от таких лазеров можно ожидать ширины полосы на уровне половинной мощности (FWHM) порядка 0,2 нм (порядка 25 ГГц). Если DFB-структура для улучшения ширины линии, генерируемой лазером, комбинируется со структурой MQW (структура со множественными квантовыми ямами), то ширина линии может быть уменьшена до сотен кГц (см. [4.3], с. 103). Если же ширина линии становится больше, возрастает хроматическая дисперсия (см. гл. 6). Это в высшей степени нежелательно для систем со скоростями передачи выше 1 Гбит/с. DFB-лазеры имеют самую узкую спектральную линию излучения среди всех известных типов лазеров на рынке. Они практически всегда используются в системах, работающих с длинными и сверхдлинными пролетами секций.

DFB-лазер — очень дорогое устройство, хотя и жизненно важное для ВОСП. Чтобы быть уверенным в оптимальной работе DFB-лазера и мониторить его, можно добавить несколько компонентов при его сборке. Например, фотодиод (PIN-диодный приемник, см. гл. 5) для мониторинга его выхода; термоэлектрический охладитель (ТЕС), который управляет температурой интегральной схемы лазера; схему обратной связи, управляющую его выходом и поддерживающую желаемую частоту. Идеальная температура ИС лазера равна 25°C.

Схема DFB-лазера представлена на рис. 4.4.

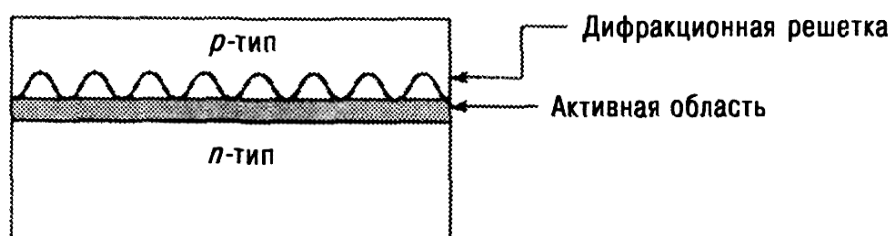


Рис. 4.4. Схема DFB-лазера.

4.3.4. DFB-лазеры с внешним модулятором

До сих пор мы изучали, или, по крайней мере, упоминали, оптические источники с непосредственной модуляцией, так называемой модуляцией интенсивности. Принципиально, все, что мы делаем - это включаем и выключаем лазер, где включение соответствует двоичной 1, а выключение двоичному 0. Фактически же лазер никогда не выключается полностью. Эквивалент такого выключения - это точка на рабочей характеристики лазера, чуть выше порога (т.е. при очень малой выходной мощности) или чуть ниже порога. Установка такого порога важна для уменьшения «чирпа» (линейной частотной модуляции - ЛЧМ), который будет рассмотрен ниже.

Другой подход в формировании двоичных 1 и 0 - это использовать оптический модулятор. Концепции использования непосредственной модуляции и оптического (внешнего) модулятора представлены на рис. 4.5. Заметьте, что оптический модулятор расположен между лазерным источником несущей волны (CW) и выходным интерфейсом волокна. Источник CW - это источник света, который всегда включен, т.е. находится в рабочем состоянии с определенным заданным уровнем мощности на выходе.

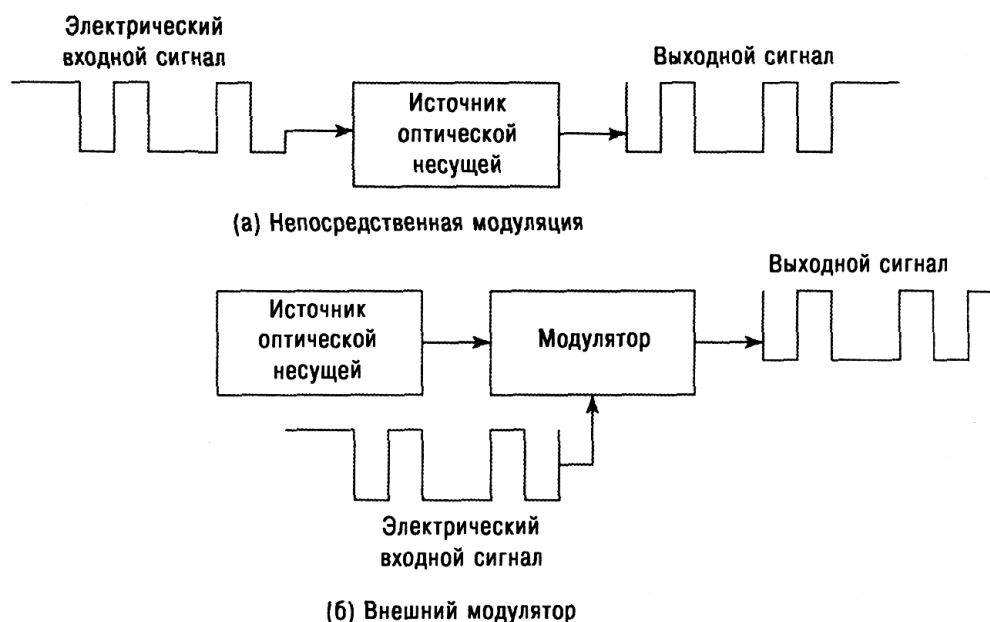


Рис. 4.5. Иллюстрации концепций лазерного (DFB) передатчика с непосредственной модуляцией (а) и того же лазера, использующего внешний модулятор (б).

Оптические модуляторы являются интегральными устройствами, спроектированными для управления уровнем непрерывной оптической мощности, передаваемой оптическому волноводу. Они работают как затворы; затвор закрыт для двоичного 0 и открыт для двоичной 1. Обычно выделяют три типа модулятора:

- 1 - Маха-Цендера (M-Z);
- 2 - с использованием электрической рефракции;
- 3 - с использованием электрической абсорбции (полупроводниковые) MQW.

Модулятор Маха-Цендера (M—Z) представляет собой интерферометр, использующий волноводы на основе ниобата лития LiNbO_3 или конфигурацию направленного разветвителя. Волноводы M-Z-модулятора имеют конфигурацию Y-разветвителя. Коэффициент преломления такого материала как LiNbO_3 может изменяться под действием приложенного внешнего напряжения. В отсутствие внешнего напряжения, оптическое/электромагнитное поле в двух рукавах M—Z-модулятора (на выходе модулятора) имеет одинаковый сдвиг фаз и интерференция синфазна. Дополнительный фазовый сдвиг, вносимый в одном из рукавов за счет изменения коэффициента преломления, вызванного приложенным напряжением, нарушает эту синфазность интерференционной картины и уменьшает мощность сигнала передатчика на выходе. В частности, наблюдается полное отсутствие света на выходе, если вносимый фазовый сдвиг между двумя рукавами будет равен π , учитывая противофазный характер интерференции. В результате такого механизма действия, электрический поток бит, поданный на модулятор, создаст оптическую копию потока бит на выходе.

Характеристики внешнего модулятора численно описываются так называемым *коэффициентом ослабления сигнала* (ER) — отношением уровней сигнала при включенном и выключенном состояниях и модуляционной шириной полосы. Модуляторы на основе ниобата лития обеспечивают ER порядка 20 (13) дБ и могут осуществлять модуляцию

потока со скоростями до 75 Гбит/с.

Модуляторы изготавливаются из электрооптических полимеров. На них достигнута модуляция потоков с предельной скоростью порядка 60 Гбит/с. Такие модуляторы часто интегрируются с электронными схемами привода (драйверами) модулятора.

Другой тип модулятора изготавливается на основе полупроводников. К ним относятся *модуляторы, использующие электроабсорбцию*. Эта технология использует эффект Франца-Келдыша, в соответствии с которым ширина запрещенной зоны полупроводника уменьшается, если к нему прикладывается поперечное электрическое поле. В этом случае прозрачный полупроводниковый слой начинает поглощать (абсорбировать) свет, когда ширина его запрещенной зоны уменьшается под действием приложенного внешнего напряжения. Это происходит в тот момент, когда энергия фотона превысит энергетический барьер запрещенной зоны. Учитывая, что эффект электроабсорбции проявляется сильнее в MQW-структурах, они и выбираются для использования в таких модуляторах. Для них коэффициент ослабления сигнала ER составляет 15 дБ и выше при напряжении смещения порядка 2 В, а реализуемая при этом скорость передачи достигает нескольких Гбит/с. Так, при скорости 5 Гбит/с была достигнута передача с низким уровнем «чирпа». Этот тип модуляторов используется в ВОСП при скоростях передачи порядка 20 Гбит/с, а в некоторых экспериментах были продемонстрированы скорости до 60 Гбит/с.

Повторяем, что основная цель использования модулятора состоит в уменьшении уширения импульса, вызванного чирпом. Многие из этих модуляторов интегрированы с ИС того же передатчика, которым они управляют.

4.3.5. Лазер с вертикальной резонаторной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL)

Для функционирования лазеров типа MLM (Фабри—Перо), SLM и

DFB требуется ток порядка нескольких десятков миллиампер. Кроме того, его выходной (расходящийся) луч, подаваемый на стык с круглым оптоволоконном, имеет в поперечном сечении эллипс с коэффициентом сжатия 3:1. Такой луч плохо стыкуется с цилиндрической формой луча, который сердцевина оптоволоконна способна принять. Нецилиндрический луч часто требует дополнительной оптики, чтобы состыковать его с круглым поперечным сечением сердечника оптоволоконна. Лазер типа VCSEL излучает столь желательный круговой луч. Сравнение геометрий пучков этих двух типов излучения можно провести на основе рис. 4.6.

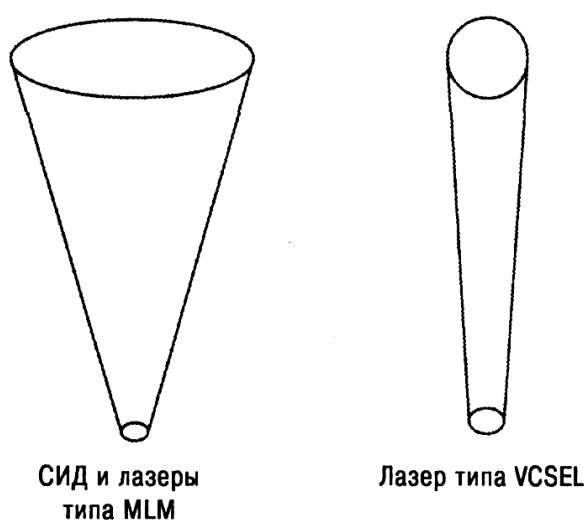


Рис. 4.6. Сравнение эллиптического выходного луча СИД и лазеров типа MLM, SLM и DFB с круговым выходным лучом, характерным для лазера типа VCSEL.

Лазер типа VCSEL представляет собой вертикальную структуру из ряда слоев p -типа, активной области, и ряда слоев n -типа. Число слоев зависит от желаемой длины волны излучения. Указанные наборы слоев охватывают отражатели Брэгга, которые изготавливаются из комбинации $\text{In}+\text{Ga}+\text{As}+(\text{Al} \text{ или } \text{P})$. Например, комбинация $\text{In}+\text{Ga}+\text{As}+\text{P}$ используется для лазеров в окне длин волн 1310-1550 нм. Требуемые слои изготавливаются методом эпитаксиального выращивания на основе планарной технологии. Лазеры типа VCSEL работают в одномодовом (продольная мода) режиме,

используя резонатор исключительно малой длины (порядка 1 мкм), для которого разнесение мод превышает полосу частот усиления. Они излучают свет в направлении перпендикулярном плоскости активного слоя, аналогично тому, как это делается в СИД с излучающей поверхностью. Работа такого лазера в одномодовом (поперечная мода) режиме может быть реализована путем уменьшения диаметра VCSEL до 2-3 мкм. Выходная мощность и ширина полосы лазеров типа VCSEL, как правило, ниже, чем аналогичные показатели DFB-лазеров, и VCSEL находит применение как в ВОСП, так и в локальных сетях. Их стоимость относительно низка по сравнению с DFB-лазерами, например. Другим применением VCSEL является лазерные массивы, где каждый лазер работает на своей длине волны, что идеально подходит для WDM-систем.

Схема структуры VCSEL-лазера приведена на рис. 4.7 [4.1, 4.3].

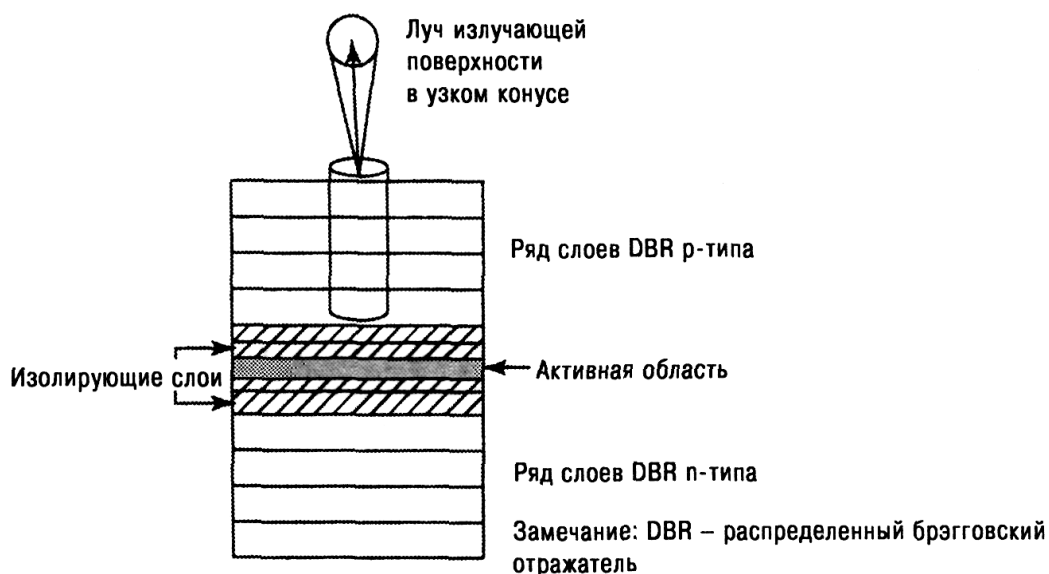


Рис. 4.7. Схема структуры VCSEL-лазера

4.4. Частотно-модулированный импульс (чирп)

4.4.1. Понятие ЧМ импульса

ЧМ импульс, или чирп, может ограничить характеристики систем

передачи на длине волны 1550 нм даже при использовании DFB-лазеров с большим (порядка 40 дБ) значением MSR (коэффициента подавления моды). Как уже отмечалось раньше, модуляция интенсивности (непосредственная модуляция) в полупроводниковых лазерах неизбежно сопровождается фазовой модуляцией (вызванной изменением, за счет индуцируемых носителей, показателя преломления), управляющей коэффициентом уширения спектральной линии. Оптические импульсы со сдвигом фазы, зависящим от времени, называются *чирп-импульсами*. В результате такого частотного чирпа, наложенного на оптический импульс, его спектр существенно уширяется. Это спектральное уширение влияет на форму импульса в волокне, учитывая дисперсию волокна (см. гл. 6), и приводит к ухудшению показателя BER в системе [4.1].

4.4.2. Подробное обсуждение ЧМ сдвига

Говорят, что импульс подвержен ЧМ сдвигу, т.е. является чирп-импульсом, если его несущая частота изменяется во времени. Эти частотные изменения соотносятся с производной фазы по времени. Частотный сдвиг, зависящий от времени, называют *чирпом*. В литературе можно прочитать о параметре C . Этот параметр регулирует *линейный частотный чирп*, наложенный на такой импульс. Чирп-импульсы могут уширяться и сжиматься. Уширение импульса рассматривается, конечно, как нежелательное, принимая во внимание характеристики дисперсии. Уширение импульса приводит к распространению энергии импульса на следующую битовую позицию и, если такое уширение достаточно велико, может вызвать появление ложного бита 1, что приведет к ошибке, если на этой битовой позиции должен был быть бит 0.

Параметр C может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Показатель BL — произведение ширины полосы частот на расстояние (размерность Гц·м) — может существенно уменьшиться при отрицательных значениях C . Это происходит из-за существенного

уширения импульса лазерного диода. При использовании непосредственной модуляции для полупроводникового лазера параметр C , обычно отрицательный, равен -6 для длины волны 1550 нм. При этом условии показатель $BL < 100$ (Гбит/с)·км, и дисперсия волокна ограничивает скорость передачи до величины 2 Мбит/с на длине пролета L в 50 км. Эту проблему можно решить путем использования волокна со сдвигом дисперсии, или же путем использования схемы компенсации дисперсии (см. гл. 6). Частотный чирп в значительной степени устраняется при использовании внешнего модулятора. Причина в том, что источник света, а это, как правило DFB-лазер, все время включен. В результате, следует признать, что при непосредственной модуляции, влияние чирпа становится очевидным и, более того, деструктивным [4.1].

4.4.3. Параметры импульсов, характеризующие эффект ЧМ сдвига

На рис. 4.8 приведена типичная форма импульса на выходе полупроводникового лазера с непосредственной модуляцией. По оси y отложена амплитуда импульса, по оси x — время t . На этом рисунке показаны два важных параметра импульса: начальное нарастание импульса и выброс на вершине (обусловленный чирпом). Тот факт, что характеристики пика последующего импульса отличаются от характеристик пика начального импульса, тоже обусловлен действием чирпа. Вершина каждого следующего импульса будет случайным образом отличаться от предыдущего.

В системах передачи исключительно важным параметром является *время нарастания импульса*. Оно определяет предел максимальной скорости передачи. Установление порогового уровня для системы также влияет на ее характеристики. Он должен быть установлен как можно ниже, но так, чтобы не нарушить условия генерации лазера. Это влияет на *коэффициент ослабления сигнала*, который должен быть максимально большим. Этот коэффициент представляет собой отношение максимальной амплитуды импульса к пороговому уровню.

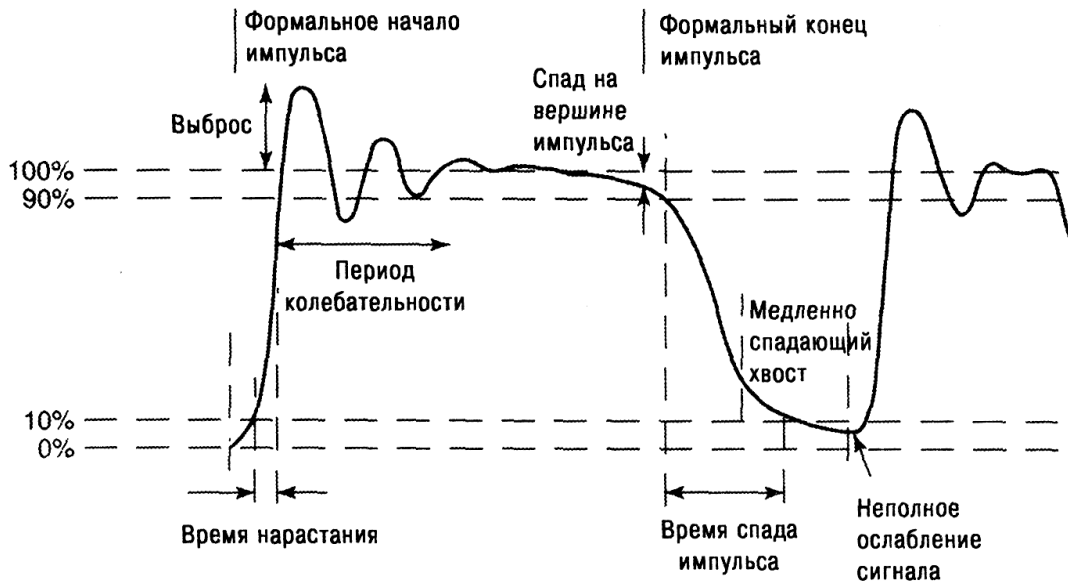


Рис. 4.8. Параметры импульса лазера (Перепечатано из [4.2], рис. 3.12)

4.5. Потери мощности

Агравал [4.1] перечислил пять физических явлений, которые, наряду с дисперсией, приводят к ухудшению отношения сигнал/шум на удаленном конце (в точке приема) в высокоскоростных ВОСП (со скоростью больше 500 Мбит/с). Таких источников — шесть:

1. Модальный шум.
2. Дисперсионное уширение.
3. Шум от распределения мощности по модам.
4. Частотный чирп.
5. Обратная связь и шум от отражения.
6. Коэффициент ослабления сигнала.

Модальный шум приводит к искажениям сигнала, характерным для ВОСП, использующих многомодовое волокно. Они вызваны интерференцией между различными направляемыми модами многомодового волокна. Она проявляется как ухудшение отношения сигнал/шум на дальнем (приемном) конце, вызванное флуктуацией амплитуды принятого сигнала. Это объяс-

няет, почему большинство многомодовых систем использует в качестве источников СИД, а не ЛД (просто потому, что спектр СИД шире).

Дисперсионное уширение может ограничить произведение BL . Оно влияет на характеристики приемника по двум причинам. Первая из них обсуждалась раньше. Мы отмечали, что уширение импульса может распространить его действие на последующий битовый интервал и привести к межсимвольной интерференции (ISI).

Вторая причина в том, что пиковая энергия импульса уменьшается в результате уширения в целом. В результате приходится увеличить уровень входного сигнала на приемной стороне, чтобы компенсировать влияние этого фактора. Для численного подсчета результатов действия этих причин, определим величину *потери мощности* δ_d :

$$\delta_d = 10 \log f_b$$

где f_b — коэффициент уширения импульса.

Потери мощности можно вычислить следующим образом:

$$\delta_d = -5 \log_{10} [1 - (4BLD\sigma_\lambda)^2]$$

где B — скорость передачи (бит/с), L — длина линии (км), D — дисперсионный параметр (пс/нм/км) и σ_λ — среднеквадратическая ширина спектра источника, предполагаемого гауссовским (гауссовский импульс имеет скругленную форму в отличие от прямоугольного импульса).

Агравал [4.1] приводит следующие значения для δ_d

$$\text{если } BLD\sigma_\lambda = 0,1, \text{ то } \delta_d = 0,38 \text{ дБ}$$

$$\text{если } BLD\sigma_\lambda = 0,2, \text{ то } \delta_d = 2,2 \text{ дБ}$$

$$\text{если } BLD\sigma_\lambda = 0,25, \text{ то } \delta_d = \infty$$

Шум от распределения мощности по модам (MPN) возникает в многомодовых ВОСП и вызван использованием полупроводниковых лазерных источников. Это явление возникает в результате антикорреляции между парами продольных мод.

Существует много таких мод, причем отдельные моды демонстрируют

заметную флуктуацию мощности, даже если общий уровень мощности остается относительно постоянным. Эти разные, по сути, моды, распространяясь по волокну, становятся рассинхронизированными, так как распространяются с разными скоростями. Это вызывает флуктуации принимаемого сигнала, что приводит к ухудшению отношения сигнал/шум, а, следовательно, к потере мощности.

Вычисление этих потерь сложно, так как требует знания коэффициента распределения мощности по модам k , значения которого находятся в диапазоне от 0 до 1. δ_{mpn} - потери мощности в дБ для шума типа MPN. Эти потери мощности можно свести к очень низкому уровню ($< 0,5$ дБ), если спроектировать оптическую систему так, чтобы $(BLD\sigma_\lambda) < 0,1$.

Рассмотрим пример для систем, работающих в окне 1300 нм [4.1]. Предположим, что рабочая длина волны с точностью до 10 нм соответствует длине волны нулевой дисперсии и $D = 1$. Типичное значение $\sigma_\lambda = 2$ для многомодовых полупроводниковых лазеров. При этих условиях потери мощности, вызванные MPN, были бы незначительны, если бы произведение $BL < 50$ (Гбит/с)км. Тогда, при $B = 2$ Гбит/с, длина линии передачи ограничивается 25 км. Потери мощности за счет MPN довольно чувствительны к ширине спектра многомодового лазера. Эту чувствительность можно снизить путем уменьшения ширины спектра лазера.

Если рассмотреть операции с DFB-лазерами в окне 1,55 мкм, то можно заметить, что потери мощности от MPN достаточно серьезны. В этой ситуации влияние MPN может быть уменьшено за счет использования DFB-лазеров с хорошими MSR-характеристиками (численно > 30 дБ).

Частотный чирп обсуждался выше в разделе 4.3. При использовании передатчиков с непосредственной модуляцией существует оптимальная установка тока смещения, используя которую можно достичь минимального чирпа. Эта установка осуществляется настройкой определенного значения r_{ex} , где r_{ex} — коэффициент ослабления сигнала, или отношение мощностей в

режимах включено и выключено. Таким образом, $r_{ex} = P_0 / P_1$, или отношение мощности при передаче 0 к мощности при передаче 1. Этот коэффициент увеличивается при установке смещения выше порогового уровня, что уменьшает «чувствительность» приемника. Общее значение потери мощности может быть уменьшено до величины < 2 дБ, если система будет работать с коэффициентом ослабления сигнала порядка 0,1 [4.1].

Обратная связь по отражению обусловлена светом, отраженным обратно к лазерному источнику. Этот отраженный свет, даже если он очень малого уровня, может послужить источником сбоя системы или вызвать ухудшение ее характеристик. Фактически это может вызвать ухудшение характеристик системы до такой степени, что в ней не удастся достичь требуемого уровня ВЕК, несмотря на бесконечное увеличение входной мощности. Отражения в волоконно-оптическом звене происходят, в основном, на стыке волокно-воздух. Нужно помнить, что значительная часть передаваемого сигнала может отразиться обратно, если не будут приняты специальные меры для уменьшения этой оптической обратной связи. До сих пор при обсуждении мы уже упоминали ряд возможностей уменьшения уровня отражения или эффектов, связанных с отражением.

В общем случае можно отметить, что большинство оптических систем работает удовлетворительно, если обратная связь по отражению по уровню ниже —30 дБ. На практике эта проблема почти решена за счет использования оптических изоляторов, размещаемых в узле передатчика (в волоконно-проводе, до соединительного оптоволоконного шнура).

Коэффициент ослабления сигнала. Недостаточный коэффициент ослабления может вызвать потерю мощности. Оптоволоконный источник света имеет два состояния: включено и выключено. Допустим, что двоичный сигнал 1 соответствует состоянию включено, а 0 — выключено. Проблема в том, что в логическом состоянии выключено передатчик физически не выключен, так как это позволяет существенно уменьшить время начального нарастания светового импульса передатчика. Это дает возможность

передатчику работать на более высоких скоростях, чем было бы возможно в случае его полного выключения для реализации логического состояния 0. Если предположить, что P_0 — выходная мощность передатчика в состоянии 0, а P_1 - выходная мощность в состоянии 1, то коэффициент ослабления сигнала можно определить так:

$$r_{ex} = P_0 / P_1$$

Это определение можно сформулировать, используя логарифмическую меру:

$$EX = 10 \log(A/B)$$

где A — средняя оптическая мощность для логической 1, а B — средняя оптическая мощность для логического 0.

Если использовать PIN -детектор, то для ряда значений r_{ex} можно привести следующие эквивалентные значения коэффициента ослабления сигнала [4.8]:

| | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| r_{ex} | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,07 | 0,05 | 0,02 |
| Потери мощности, дБ | 3 | 2,2 | 1,7 | 1,0 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |

4.6. Основные параметры промышленных источников светового излучения

4.6.1. Светоизлучающие диоды (СИД)

Выходная мощность СИД, в зависимости от конструкции и производителя, лежит в пределах между 0,01 и 0,1 мВт (от -20 до -10 дБм).

Существуют две нежелательные особенности у СИД, которые проектировщик системы должен принимать во внимание:

1. Угловая ширина излученного пучка:
 - а) для СИД с излучающей поверхностью — порядка 120° ;
 - б) для СИД с излучающим срезом — порядка 30° .
2. Ширина спектра излучения: 30-80 нм.

СИДы производятся для работы в трех окнах прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм. Однако, чаще всего они используются в первых двух окнах: 850 и 1310 нм.

СИДы существенно дешевле в производстве, чем ЛД; они имеют значительно больший срок службы и не требуют стабилизации температуры при работе в нормальных условиях. Что же касается условий светопередачи (на стыке СИД-волокно), то их эффективность мала. Однако, из двух указанных типов, СИД с излучающим срезом значительно более эффективен, чем СИД с излучающей поверхностью. Их применение обычно ограничено системами, работающими на скорости 155 Мбит/с и ниже. СИДы особенно широко используются в офисных системах заказчика. В табл. 4.1 приведена сводка основных параметров СИД с излучающим срезом и их типовых значений.

Таблица 4.1

Сводка основных параметров СИД с излучающим срезом

| Параметр | Значение |
|--|---------------------|
| Выходная мощность, излучаемая в одномодовое волокно (25°C) | 2-50 мкВт |
| Числовая апертура (NA) | 0,1 - 0,6 |
| Время нарастания/спада импульса | 3 нс (максимум) |
| Ширина полосы излучения на уровне половины мощности | 30-60 нм |
| Температурный коэффициент мощности | 1,2%/°C (типовое) |
| Изменение центральной длины волны с температурой | 0,5-0,8 нм/°C |
| Спектральное уширение | 0,4 нм/°C (типовое) |

Источник. Данные, приведенные в [4.2, 4.4, 4.5].

4.6.2. Лазерные диоды (ЛД)

Полупроводниковые лазерные диоды, как правило, используются в качестве источников света в высокоскоростных (> 155 Мбит/с) системах дальней связи. Выходная мощность лазерных источников для большинства производителей составляет порядка +3 - +10 дБм (1-10 мВт). Лазерные диоды с большей мощностью (напр., +20 дБм) также начали появляться на рынке.

Сейчас достаточно поставить на выходе лазерного источника оптический усилитель, например, типа EDFA (см. гл. 7), чтобы увеличить его выходную мощность до 500 мВт или выше. Одной из причин, заставляющих производителей выпускать лазеры с большей мощностью на выходе, является широкое использование систем DWDM (плотного мультиплексирования по длине волны). Линейные компоненты систем DWDM имеют высокие вносимые потери. Использование таких высоких уровней выходной мощности вместе с оптическими усилителями помогает преодолеть потери в системах DWDM. Лазеры, работающие на таких больших уровнях мощности, принесли ряд проблем, в частности проблему влияния большой мощности на оптические компоненты тракта передачи. Изоляторы, используемые в качестве универсального устройства снижения световой энергии, отраженной в сторону такого лазерного источника, имеют возвратные потери > 80 дБ, что позволяет эффективно снижать отраженную мощность.

Допустим, что мы разместили последовательно ЛД типа DFB (напр., типа Lucent D2500), внешний модулятор, собранный по схеме Маха-Цендера (напр., типа Lucent Lithium-Niobate) и усилитель типа Lucent EDFA с усилением 28 дБ. И пусть выход лазерного диода будет на уровне 0,0 дБм, а вносимые потери внешнего модулятора составляют 6 дБ. Кроме этого могут быть другие потери мощности порядка 2 дБ за счет использования изоляторов и оптических разъемов. Выходная мощность такой комбинации будет равна:

$$0,0 \text{ дБм} - 6 \text{ дБ} - 2 \text{ дБ} + 28 \text{ дБ} = +20 \text{ дБм}.$$

Если воспользоваться рекомендуемым компанией Lucent значением потерь мощности за счет дисперсии, то выходная мощность уменьшится до +18 дБм.

4.6.3. Сравнение характеристик СИД с характеристиками некоторых типов лазерных диодов

Сравнение характеристик СИД с излучающим срезом (ELED) и других

типов лазерных диодов приведено в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Сводка параметров СИД типа ELED и других ЛД^{а)}

| Параметр | СИД типа ELED | FP (MLM)-лазер | DFB-лазер с внешним модулятором | Лазер типа VCSEL |
|-------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Длина волны, нм | 850/1310 | 1310/1550 | 1550 | 850/1310 |
| Мощность на стыке с ОВ, дБм | -10 - -15 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Спектральная ширина линии, нм | 30-60 | < 3 | <0,1 | < 3 |
| Максимальная скорость, Гбит/с | < 0,155 | >2 | > 10 ^{б)} | 2 |
| Тип волокна | многомодовое | одномодовое | со сдвигом дисперсии | многомодовое или одномодовое |
| Цена | низкая | умеренно высокая | высокая | умеренная |
| MTBF ^{в)} , часы | 10 ⁹ | 10 ⁸ | 10 ⁷ | 10 ⁸ |

а) Спектральная ширина линии определяется в терминах полной ширины на половине от максимума (FWHM). Это спектральная ширина излучаемого светового сигнала оптического источника, измеренная в нанометрах на уровне половины пикового значения мощности.

б) В настоящее время это значение расширено до 40 Гбит/с, но может быть и больше.

в) MTBF - среднее время наработки на отказ. Это значение оценочное, при условии, что устройство работает в нормальных условиях.

Источники. [4.1, 4.2, 4.4, 4.6, 4.7].

4.6.3.1. Сравнение ширины спектра излучения СИД и ЛД

На рис. 4.9 приведены для сравнения формы спектральных линий СИД и лазерного диода.

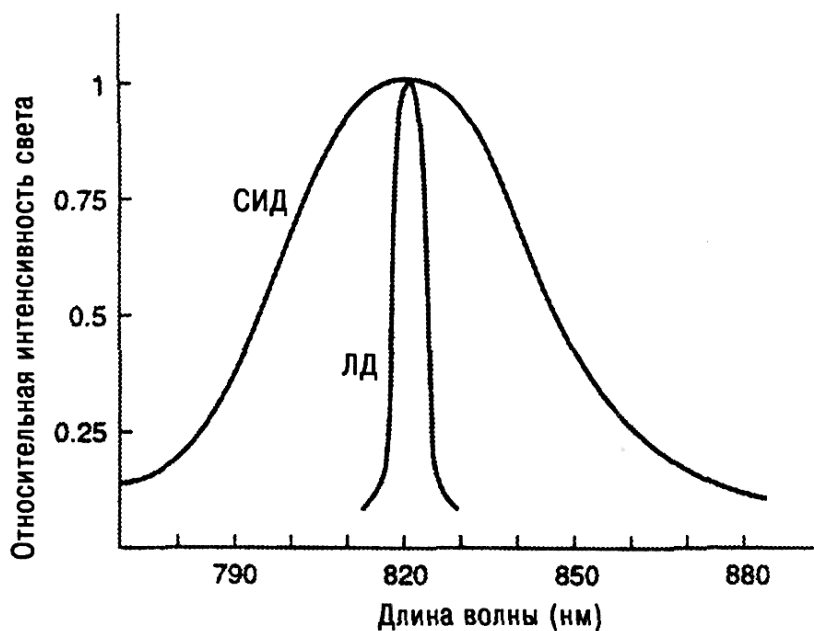


Рис. 4.9. Типичные спектры линий, излучаемых СИД и ЛД. Амплитуды спектральных линий были нормализованы (приведены к одному значению).

Фактически пиковая интенсивность ЛД много больше, чем у СИД.

4.6.4. Рабочие характеристики некоторых промышленных лазерных диодов

4.6.4.1. Настраиваемые лазерные передатчики для длинных секций и скорости 2,5 Гбит/с типа С488 компании Lucent Technologies

Передатчик С488 создан на основе лазера на 1500 нм, электроабсорбционного модулятора и интегрированного стабилизатора. Компания Lucent утверждает, что это устройство способно вести передачу на расстояние 360 км или 640 км на скорости 2,5 Гбит/с. Оно может быть использовано в системах DWDM с шагом несущих в 50 ГГц и меньше. В табл. 4.3. приведены его основные оптические характеристики.

Основные оптические характеристики SLM (DFB) - лазерного передатчика

| Параметр | Типовое значение | Значение по рекомендации G.957 | Промышленное значение | Комментарий |
|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|
| Выходная средняя оптическая мощность | 0 дБм | +3 дБм | +2 - +6 дБм | > +20 дБм ^{1,2)} при использовании ОУ по определению |
| Флуктуации выходной мощности | 0,5 дБ | +3 - -2 дБ | 0,5 дБ | учтено в бюджете звена связи |
| Потери за счет дисперсии | 1,0 дБ | в стадии изучения | 2 дБ для длинной секции | желательно расширение до 1600 ³⁾ |
| Рабочий диапазон волн, нм | 1280-1480; 1500-1650 | 1260-1360; 1500-1580 | 1260-1480; 1500-1660 | - |
| Минимальные возвратные потери | 24-30 дБ | 24 дБ | 24 дБ | желательно иметь > 11 дБ |
| Коэффициент ослабления сигнала | 10 дБ | 8,2; 8,3 дБ | 11 дБ | |

¹⁾ Выходная мощность должна быть регулируема, чтобы иметь возможность работать с короткими секциями

²⁾ Высокая выходная мощность требуется для работы в системах WDM, учитывая потери, вносимые компонентами.

³⁾ Рабочий диапазон в окне прозрачности 1550 нм может быть ограничен рабочим диапазоном усилителя EDFA.

Источники. Рекомендация ITU-T G.957, [4.1, 4.6, 4.7, 4.8].

4.6.4.2. Лазерные DFB-передатчики для скорости 10 Гбит/с компании OKI

Структура. На рис. 4.10 показана структура DFB-лазера с модулятором компании OKI. Все кристаллы выращены на основе процесса эпитаксии метал - логанических соединений из газовой фазы (MOVPE). Лазерная (DFB) область представлена скрытой структурой обычного лазерного *pn*-блока. Его активный слой представлен пятислойной MQW-

структурой, в которой слои с квантовыми ямами являются слоями InGaAs, а барьерные слои - слоями InGaAsP. Область модулятора является мезаструктурой с высоким гребнем, в которой перемычка из InGaAsP, имеющая ширину перехода, соответствующую длине волны 1480 нм, используется как поглощающий слой. С обоих концов этот гребень углублен в полиимидный полимер для уменьшения емкости электрода. Фронтальная поверхность модулятора обработана антиотражающим покрытием. Оптический стык между DFB-лазером и модулятором выполнен по методу стыковки торцов. Рассматриваемый лазер имеет длину лазерной области 350 мкм, а длина области модулятора составляет 200 мкм. Эти две области отделены 30 микронной областью разделения электродов.

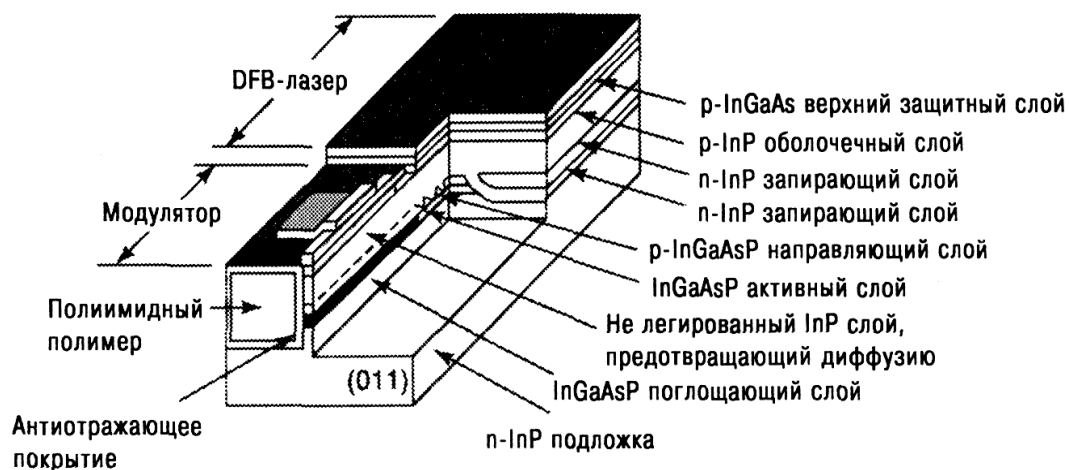


Рис. 4.10. Схематическое изображение структуры DFB-лазера с модулятором компании OKI. (См. [4.7], рис. 1)

Сопротивление области разделения электродов – 10 - 20 кОм.

Оптическая выходная мощность такого лазера - примерно 4 мВт (+6 дБм) при условии, что ток возбуждителя лазера — 100 мА, эффективность ослабления светового сигнала - 10 дБ/В, а ширина полосы частот на уровне -3 дБ составляет 16 ГГц. Параметр боковых полос, составляет 0,3-0,4.

ИС возбуждителя. ИС возбуждителя приводит в действие модулятор, работающий на скорости 10 Мбит/с, с помощью сигнала амплитудой 2 В (двойная амплитуда) или больше. Форма волны на его выходе близка к

прямоугольной (время нарастания и спада мало, существует небольшое дрожание фазы — джиттер). Устройство возбуждения состоит из двухкаскадной схемы дифференциального усиления. Усиление линейно и существует ограничение по амплитуде во втором каскаде. Это приводит к тому, что амплитуда выходного сигнала постоянна. Полевой транзистор (ПТ), используемый для этой ИС — InGaAs/GaAs травленный ПТ с затвором Шотки и скрытым p -слоем (BP-MESFET), затвор длиной 0,2 мкм.

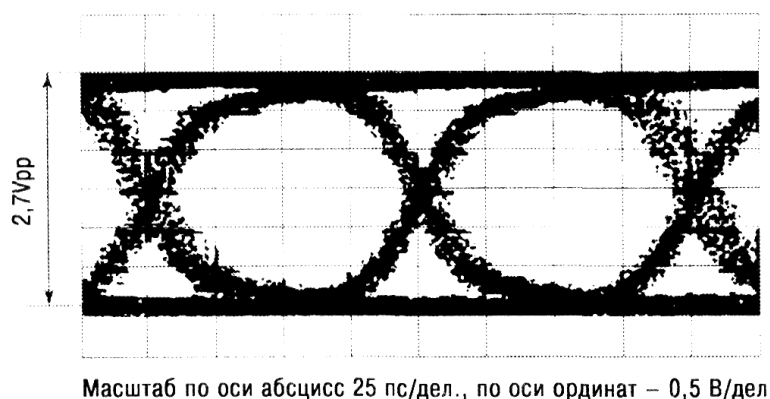


Рис. 4.11. Глазковая диаграмма выходного сигнала ИС возбуждения на скорости 10 Гбит/с. (См. [4.7], рис. 2)

На рис. 4.11 показана глазковая диаграмма выходного сигнала ИС возбудителя, работающего на скорости 10 Гбит/с. В качестве тестового использовался псевдослучайный NRZ-сигнал (сигнал в формате «без возвращения к нулю» — БВН, см. разд. 4.7.) с двойной амплитудой 0,8 В. Выходная двойная амплитуда сигнала возбуждения составляла 2,7 В (V_{pp}), а время нарастания и спада (в интервале от 20 до 80% амплитуды) - 32 и 30 пс соответственно. Для малосигнальной частотной характеристики с шириной полосы 9,5 ГГц на уровне - 3 дБ, усиление составляло 15 дБ. Потребляемая мощность составляла 1,8 Вт. Этот выходной сигнал был достаточен для возбуждения модулятора, работающего на скорости 10 Гбит/с.

Конструкция модуля. На рис. 4.12 показана схема компоновка (вид сверху) модуля оптического передатчика. В модуле размещены DFB-лазер с модулятором, ИС возбуждения, фотодиод для монитора, термистор,

термоэлектрический охладитель для стабилизации внутренней температуры, терминирующий резистор, линза и оптический изолятор.

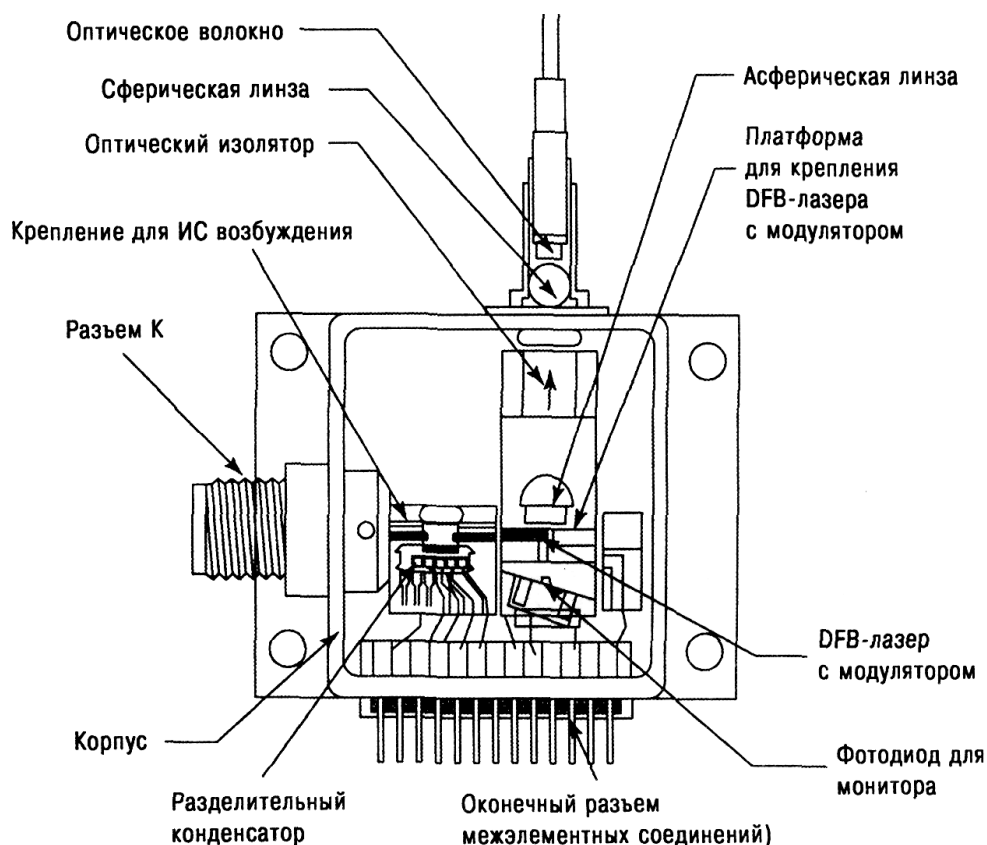


Рис. 4.12. Схема компоновка (вид сверху) модуля оптического передатчика.
(С разрешения компании OKI Electric Co., см. [4.7], рис.3)

Характеристики. Оптическая эффективность состыкованного модуля передатчика составляет больше 60%. Коэффициент ослабления сигнала равен 12 дБ при условии, что амплитуда ИС возбуждения равна 0,6 В. На рис. 4.13 приведена частотная характеристика модуля, снятая для малого сигнала, и возвратные потери. Полоса на уровне -3 дБ составляет 9 ГГц, а возвратные потери — 15 дБ и выше вплоть до 12 ГГц.

В эксперименте 10 Гбит/с передачи с использованием этого модуля на вход модуля подавался 10 Гбит/с псевдослучайный сигнал, кодированный по схеме NRZ (БВН). Выходной сигнал модуля усиливался с помощью ОУ типа EDFA и затем подавался на вход ВОСП. Длина линии связи составляла 80 км, длина волны несущей - 1554 нм, среда передачи - волокно со сдвигом

нуля дисперсии (в точку 1550 нм). Полная величина накопленной дисперсии составила 54,4 пс/нм. Приемник на удаленном конце преобразовывал входные оптические сигналы в электрический эквивалент. Эти сигналы проходили через схемы выделения временной последовательности, а затем схемы логического детектирования.

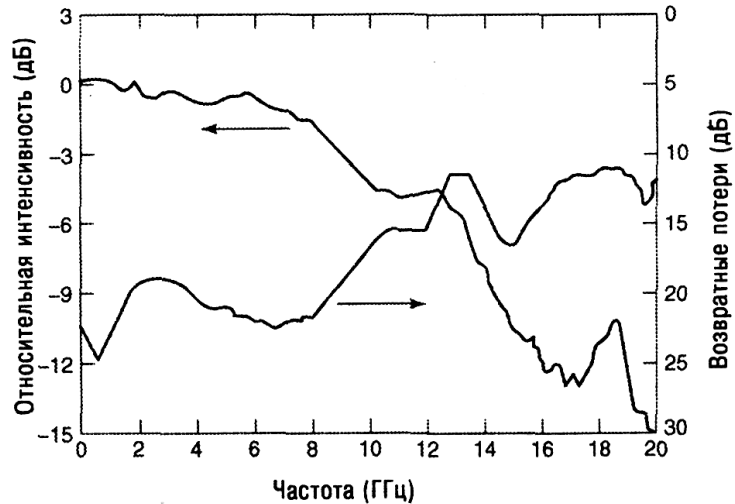


Рис. 4.13. Малосигнальная частотная характеристика. (С разрешения компании OKI Electric Co., см. [4.7], рис. 4)

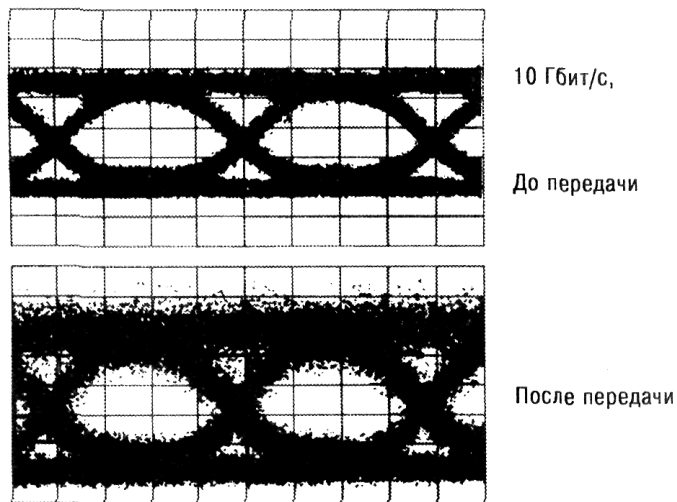


Рис. 4.14. Глазковая диаграмма до и после передачи. DSF - волокно со сдвигом дисперсии. (С разрешения компании OKI Electric Co., см. [4.7], рис. 5)

На рис. 4.14 показаны глазковые диаграммы до и после передачи. На рис. 4.15 приведены результирующие характеристики ВЕК по отношению к

уровню входного сигнала приемника. Уровню ВЕК порядка 10^{-9} соответствует уровень мощности на входе приемника $-30,7$ дБм. В этом эксперименте не наблюдалось какой-то потери мощности и на характеристике не был зафиксирован видимый нижний порог даже после передачи.

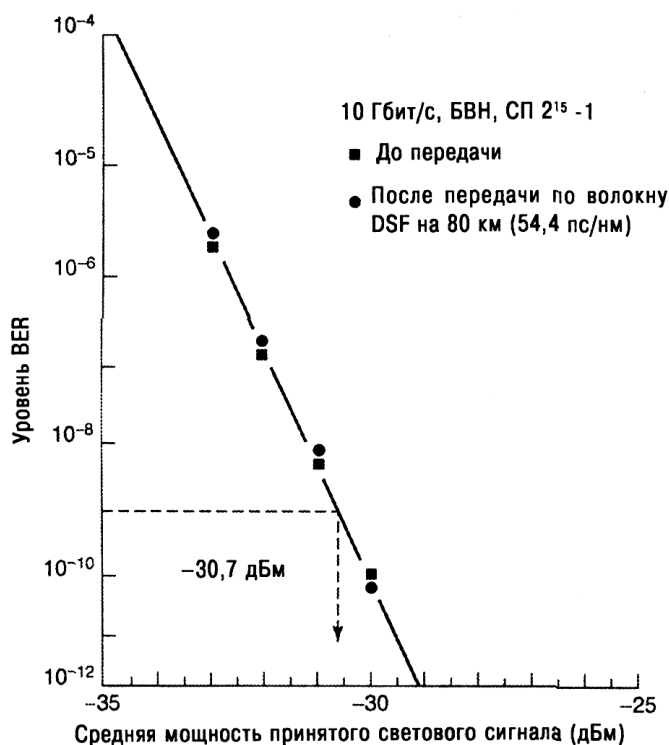


Рис. 4.15. Уровень ВЕК по отношению к мощности на входе приемника. (С разрешения компании OKI Electric Co., см. [4.7], рис. 6)

4.7. Настраиваемые лазеры

Настраиваемый лазер - основной двигатель оптической коммутации в оптических сетях DWDM. Он будет также играть важную роль в современных приложениях, использующих оптические мультиплексоры ввода-вывода. Оптические сети рассмотрены в гл. 17.

Существуют три основных требования к характеристикам оптических сетей DWDM, а именно: длина пролета, шаг между каналами (напр., 100, 50

или 25 ГГц) и скорость передачи (напр., 2,5; 10 или 40 Гбит/с). Различные приложения, использующие коммутацию и мультиплексоры ввода-вывода, приводят к различным наборам требований к характеристикам. Эти требования зависят от выходной мощности, времени настройки и диапазона настройки. Все это параметры настраиваемых лазеров, включенные в список, приведенный ниже.

Четыре типа приложений наиболее характерны для настраиваемых лазеров:

1. Оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM);
2. Региональные оптические сети (MAN);
3. Длинные пролеты (секции), как часть оптической сети;
4. Ультрадлинные пролеты (секции).

Выбор технологии настраиваемых лазеров зависит от многих параметров, среди них:

- выходная мощность,
- ширина линии излучения,
- диапазон настройки,
- шум относительной интенсивности,
- время настройки,
- стабильность.

Существует ряд лазерных структур, которые могут быть выбраны для производства настраиваемых лазеров. Можно выделить пять таких структур. Каждая структура имеет свои достоинства и недостатки. Некоторые из этих устройств уже рассматривались нами выше. В этом разделе мы рассмотрим их не как устройства с фиксируемой длиной волны, а как устройства с возможностью перестройки. К ним относятся DFB-лазеры (разд. 4.3.3 и 4.3.4), лазеры с распределенным брэгговским отражателем (DBR-лазеры), DBR-лазеры с выбранными решетками (SG-DBR), VCSEL-лазеры (разд. 4.3.5) и лазеры с внешней резонаторной полостью (ECL-лазеры).

4.7.1. Настраиваемый DFB-лазер

Как отмечалось в разд. 4.3.3, DFB-лазеры имеют относительно простую структуру, которая использует внутреннюю дифракционную решетку для изменения рабочей длины волны. В идеале проектировщик может настроить эти лазеры на длины волн, соответствующие сетке ИТУ-Т (см. гл. 8, табл. 8.3). Длина волны, или частота, изменяется при изменении температуры среды. Это можно сделать путем изменения тока возбуждения или путем использования температурно-контролируемого теплового стока. Тепловой сток изменяет коэффициент преломления внутреннего волновода. Современные термоэлектрические охладители могут точно управлять температурой для генерации узкой полосы частот на выходе.

Диапазон настройки DFB-лазеров ограничен примерно 5 нм; и, в случае возрастания температуры, эффективность DFB-лазера и выходная мощность падают. Один из путей расширить диапазон настройки - использовать ансамбль таких устройств, интегрированных в один массив, обычно три лазера на подложку ИС, которая связана с единым выходом. Только один лазер в любой момент времени может быть возбужден для выбора длины волны. Ясно, однако, что этот подход не относится к непрерывной настройке. Окончательные размеры ИС ставят вопрос о выходе годного, а механизм объединения оказывается неэффективным. Трудно достичь стабильности мод для каждой из лазерных секций.

4.7.2. Лазер с распределенным брэгговским отражателем (DBR)

DBR-лазер — лазер с распределенным брэгговским отражателем — изготавливается из двух или больше секций и использует по крайней мере, одну активную область (усилительную полость) и одну пассивную область, как показано на рис. 4.16.

Как показано на этом рисунке, пассивная область содержит дифракционную решетку. Каждый конец лазерной полости имеет отражающую поверхность. Длина волны лазера настраивается путем изменения пассивной

области для того, чтобы изменить показатель преломления. Различие DFB-лазера и DBR-лазера в том, что активная область и область, где находится решетка, отделены друг от друга в DBR-лазере, тогда как в DFB-лазере эти области объединены.

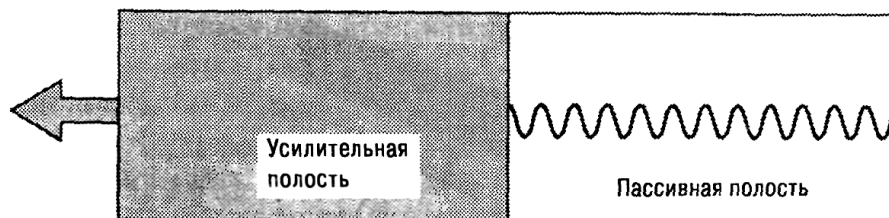


Рис. 4.16. Схема лазера с распределенным брэгговским отражателем. (С разрешения компании Iolon Inc., см. [4.11])

Диапазон настройки DBR-лазера равен примерно 40 нм, он настраивается очень быстро. Одним из его недостатков является то, что эта схема может быть ограничена током насыщения. Другим недостатком является трудность управления длиной оптического пути между двумя отражателями на концах полости. В результате может возникнуть нестабильность или уширение линии.

4.7.3. DBR-лазеры с выбранными решетками (SG-DBR)

SG-DBR-лазер является настраиваемым лазером, который использует отражательные дифракционные решетки на каждом конце полости для создания гребенчатого спектра резонансной характеристики. Учитывая, что решетки, выбранные для фронта и тыла полости, имеют несколько отличающиеся шаги нарезки, их гребенчатые спектры также имеют несколько отличающиеся позиции модовых пиков. Изменяя ток в секциях этих двух решеток можно выровнять две гребенки так, чтобы получить нужную длину волны.

Для улучшения стабильности моды и уменьшения шума, требуется еще один контакт, позволяющий подстроить фазу. При этом допускается существование целого числа полуволин. Когда длина волны меняется, то

кажется, что лазер «прыгает» с одной волны на другую.

SG-DBR-лазеры имеют широкий диапазон настройки. Однако они становятся все более сложными и страдают тем, что имеют низкую выходную мощность и широкую спектральную линию. Производство таких устройств очень сложно.

4.7.4. VCSEL-лазеры

VCSEL-лазеры — лазеры с вертикальной полостью и излучающей поверхностью — описаны в разд. 4.3.5. Они имеют несколько преимуществ при использовании как настраиваемые лазеры. Их спектральная линия излучения узкая, они демонстрируют низкое потребление мощности и могут быть использованы для непрерывной настройки без перескакивания мод. Их принципиальный недостаток — ограниченная выходная мощность. Нужно заметить, что низкая выходная мощность — основная особенность этих лазеров, обусловленная конструкцией. Благодаря этому ограничению можно поддерживать одну пространственную моду в качестве рабочей, используя очень небольшую активную область.

4.7.5. Лазеры с внешней резонаторной полостью

ECL-лазеры — лазеры с внешней резонаторной полостью - имеют характерную соответствующую названию конструкцию. Используя внешнюю резонаторную полость, можно осуществлять настройку длины волны лазера механически за счет настройки самой полости. Другие возможности такие же, как у других типов лазеров — за счет изменения тока или температуры полупроводникового материала.

На рис. 4.17 приведена схема ECL-лазера на основе дифракционной решетки, построенная с использованием конфигурации полости, предложенной Литманом—Меткалфом (Littman-Metcalf). Такой лазер фактически повторяет схему ЛД с резонатором Фабри-Перо (см. разд. 4.3.1). Лазер состоит из отдельно изготовленных усилительной среды и внешнего резонатора. Сам же

резонатор собран из отдельно изготовленных оптических узлов, таких как дифракционная решетка и зеркало, интегрируемых на определенном шаге сборки. Для настройки достаточно приложить напряжение к приводу MEMS (микроэлектромеханической системы), который вращает зеркало так, чтобы лазерный диод захватил определенную дифрагирующую волну. Фактическая длина волны на выходе лазера определяется совокупностью факторов: полосы усиления диода, дисперсией дифракционной решетки и структурой мод внешнего резонатора.

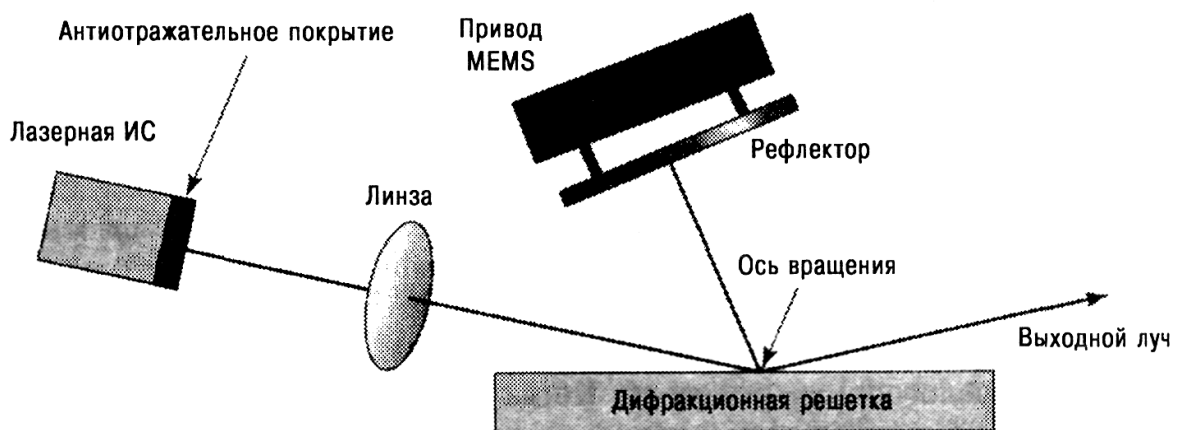


Рис. 4.17. Настраиваемый лазер с внешним резонатором. Обратите внимание, что вращение зеркала на приводе MEMS объединяется с усилительной средой лазерной ИС и дифракционной решеткой, для того чтобы поймать единственную длину волны, направленную обратно к лазерной ИС. Эта схема и формирует настраиваемый лазер с внешним резонатором. (С разрешения компании Iolon, Inc., см. [4.11])

ЕСL-лазеры имеют много привлекательных, для использования в оптических сетях и оптических мультиплексорах ввода-вывода, характеристик. Они имеют возможность непрерывной настройки в интересующем нас диапазоне и демонстрируют узкую полосу спектральной линии, с малым шумом и высокой стабильностью. У них не наблюдаются «скачки» мод, как это происходит, например, у DBR-лазеров. Они также имеют относительно высокий уровень выходной мощности. Их недостаток — большие размеры и

стоимость. Они не чувствительны к ударам и другим воздействиям окружающей среды.

Использование технологии MEMS устранило многие недостатки. Например, использование MEMS при конструировании оптических элементов, которые стали умещаться на стандартной карте (плате) передатчика, сделало цену ECL-лазеров более привлекательной.

В работе [4.9] утверждается, что одной из ключевых технологий в развитии ECL-лазеров на основе MEMS является технология *глубокого травления реактивными ионами* (DRIE), используемая при производстве приводов MEMS. Эта технология позволяет производить надежную и привлекательную по цене продукцию жестких механических структур привода. Они обеспечивают надлежащее усилие для высокоскоростного и высокоточного перемещения оптических элементов в широком линейном и угловом диапазонах. Приводы MEMS в результате дешевы, достаточно точны и нечувствительны к ударам, вибрации, температурным изменениям или медленным изменениям характеристик.

Эти же самые приборы могут быть реконфигурированы так, чтобы сформировать настраиваемые приемники, контроллеры поляризации, оптические мониторы, переменные аттенюаторы, оптические переключатели и настраиваемые фильтры. Типичный ECL-лазер на основе MEMS, использующий технологию DRIE, имеет выходную мощность порядка 10 мВт и диапазон настройки 13 нм. Эти устройства могут иметь также 20 мВт мощности на выходе и перекрывать диапазон перестройки порядка 40 нм.

В табл. 4.4. проведено сравнение пяти типов настраиваемых лазеров, учитывая их достоинства и недостатки.

Сравнительные характеристики настраиваемых лазеров.

| Тип лазера | Преимущества | Недостатки | Применение |
|--|---|--|--|
| С распределенной обратной связью (DFB) | стабильность излучения; в процессе производства | относительно низкая выходная мощность ¹⁾ ; ограниченный диапазон настройки | для узкого диапазона настройки; широко используется в длинных секциях |
| С распределенным брэгговским отражателем (DBR) Типа (DBR) с выбранными решетками | высокая скорость переключения ²⁾ широкий диапазон настройки; высокая скорость переключения ²⁾ | большая ширина линии; нестабильность длины волны низкая выходная мощность; большая ширина линии; отсутствие непрерывной настройки | сети доступа; оптические мультиплексоры ввода-вывода сети доступа; региональные сети; оптические мультиплексоры ввода-вывода |
| С вертикальной полостью и излучающей поверхностью (VCSEL) | малая ширина линии при О/Р ³⁾ ; низкое потребление; круговой луч; широкий диапазон настройки | низкая выходная мощность при Е/Р ³⁾ ; ограничен коротковолновыми диапазонами 850/1310 нм | региональные сети и сети доступа |
| С внешними резонансными микрополостями | высокая мощность; малая ширина линии; низкий уровень RIN; непрерывность и широкий диапазон настройки | скорость настройки чувствительна к ударам и вибрациям | длинные и ультрадлинные секции; OADM для региональных сетей; сети с коммутацией |

¹⁾ DFB-лазер с фиксированной длиной волны имеет > 20 мВт выходной мощности, а настраиваемые DFB-лазеры имеют ограниченную мощность.

²⁾ Когда не требуется термостабилизация. При использовании термостабилизации типичное время настройки составляет > 25 мс

³⁾ О/Р — с оптической накачкой. Е/Р — с электрической накачкой. VCSEL имеет обычно узкую спектральную линию, но большую мощность на выходе при О/Р и, наоборот, широкую спектральную линию (~ 150 МГц) и небольшую мощность на выходе при Е/Р.

Источники. Компания Iolin Inc., San Jose, CA [4.11].

4.8. Модулированные импульсные последовательности

Важным вопросом проектирования цифровой системы является формат электрического сигнала, подаваемого на источник света. Другими словами, по целому ряду причин важна та манера, в которой 1 и 0 передаются на модулятор света или на вход лазера, в случае использования непосредственной модуляции.

Во-первых, усилители для оптоволоконных приемников обычно связаны по переменному току. В результате этого, каждый световой импульс, попадающий на детектор, формирует линейный электрический выходной отклик с хвостом малой амплитуды, но относительно большой длительности. При большой скорости передачи хвосты от последовательности импульсов могут иметь тенденцию накапливаться, приводя к возникновению условий, известных как *случайное блуждание базового уровня*. Такие хвосты вызывают межсимвольную интерференцию. Если число импульсов, соответствующих состояниям «включено» и «выключено», может сохраняться сбалансированным на период, достаточно короткий по сравнению с длиной хвоста, то эффект связи по переменному току сведется просто к появлению постоянного смещения на линейном выходе приемника, которое может быть скомпенсировано путем подстройки порога регенератора. Для создания такого баланса можно выбрать соответствующий формат линейного кода. Этот выбор важен также для синхронных систем с самосинхронизацией на стороне приемника.

На рис. 4.18 показаны пять широко используемых кодов двоичного формата. Каждый из них кратко обсуждается ниже.

1. *NRZ-код* (код БВН — без возвращения к нулю). Это наиболее часто применяемый формат кода в системах передачи данных. Нужно быть внимательным к форме сигнала, так как она может быть обратной той, что используется в стандартах, например, в EIA-232 или в ITU-T V.10 и V.11. Для волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), двоичная 1 —

активный сигнальный элемент, двоичный 0 - пассивный сигнальный элемент. В коде NRZ изменение состояния происходит только при переходе из 1 в 0 или из 0 в 1. Строка с двоичными единицами - это непрерывный импульс, соответствующий состоянию «включено», а строка с двоичными нулями — это непрерывный импульс, соответствующий состоянию «выключено». В коде NRZ информация извлекается из факта наличия или отсутствия перехода в синхронной последовательности, причем сигнальный импульс полностью занимает предназначенный ему битовый интервал (или двоичную позицию).

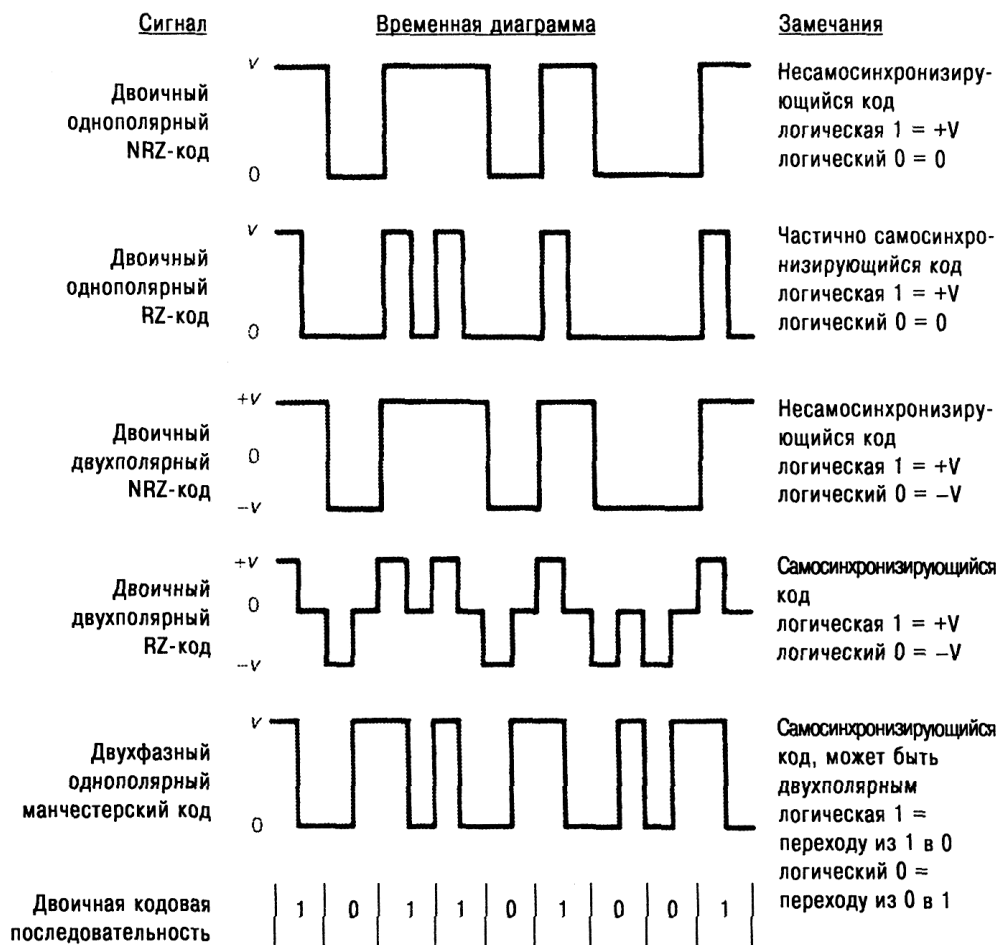


Рис. 4.18. Пять примеров кодов двоичного формата.

2. RZ-код (код ВН — с возвращением к нулю). В этом коде переход осуществляется для каждого факта передачи бита, независимо от того передается 1 или 0, как показано на рис. 4.18. В результате ширина импульса

меньше ширины битового интервала, чтобы допустить «возможность возвращения у нулю». (Заметим, что говоря «возвращение к нулю», мы имеем в виду сигнал, возвращающийся к уровню 0 вольт. Конечно условие «ноль вольт» не соответствует в действительности точно нулю вольт. Этот уровень определяется установкой порогового уровня лазера или СИД, часто это небольшое положительное напряжение.)

3. *Двухполярный NRZ-код* (двухполярный код БВН). Этот кодовый формат похож на формат NRZ, за исключением того, что двоичная 1 имеет противоположную 0 полярность.

4. *Двухполярный RZ-код* (двухполярный код ВН). Этот кодовый формат похож на формат двухполярного NRZ, за исключением того, что для каждого сигнального элемента (т.е. бита) существуют условия для возвращения к нулю, и опять ширина импульса всегда меньше ширины битового интервала.

5. *Манчестерский код*. Этот код используется в ряде ВОСП. В нем двоичная информация передается переходами в середине импульсного интервала. По соглашению логический 0 определяется как положительный переход (переход от 0 к 1), тогда как логическая 1 — как отрицательный переход (переход от 1 к 0). Сигнал при этом может быть как однополярным, так и двухполярным.

Выбор формата кода важен при проектировании ВОСП, и при этом существует немало компромиссных вариантов. Например, формат RZ помогает избавиться от случайного смещения базового уровня. Для выделения сигнала синхронизации в синхронных системах связи, манчестерский код и двухполярный RZ код являются хорошими кандидатами на использование, благодаря их возможности самосинхронизации. Однако, как видно из рис. 4.18, они требуют вдвое большей полосы пропускания, чем однополярный формат кода NRZ. Одним из преимуществ манчестерского кодирования здесь является тот факт, что он может быть однополярным, этот факт хорошо укладывается в схему непосредственной модуляции по интенсивности источников СИД и ЛД, а также обеспечивает по крайней мере один переход

внутри единичного интервала (т.е. бита) для самосинхронизации.

Используя формат NRZ, мы можем поддерживать наибольшую мощность в расчете на бит информации, при условии, что допускается случайное смещение базового уровня (обсуждение этого факта можно найти в книге [4.8]). Достижение такой мощности особенно желательно при использовании в качестве источников СИД. С другой стороны, ЛД-источники позволяют достигать высокого уровня мощности за короткий интервал, продляя тем самым работоспособность ЛД и делая формат RZ более привлекательным. Увеличение срока службы при коротком цикле может быть хорошим компромиссом для систем с высокими скоростями модуляции, используемыми в результате требований увеличить ширину полосы пропускания ВОСП. Как мы видели, системы с кодом RZ требуют как минимум вдвое большей ширины полосы пропускания канала, чем системы с кодом NRZ при той же скорости передачи данных. Это вызвано тем, что системы с кодом RZ используют много больше переходов в единицу времени при той же самой двоичной последовательности, чем системы с кодом NRZ.

ГЛАВА 5 ДЕТЕКТОРЫ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. Введение

В этой главе мы опишем конструкцию, работу и характеристики приемников светового излучения, или, как их обычно называют, *детекторов светового излучения* (детекторов света). Источники светового излучения, с которыми мы работаем, сделали для нас привычными такие параметры, как выходная мощность в мВт или дБм и полоса частот в Гц. В этой главе язык и терминология, такая как чувствительность отклика, темновой ток и эквивалентная шумовая мощность, будут новыми для многих наших читателей.

Детектор света есть не что иное, как счетчик фотонов, преобразующий энергию падающего света в электрическую энергию. В общем случае в этой главе мы будем иметь дело с двумя основными типами детекторов света: *PIN-диодами* и *лавинными фотодиодами (APD)*. Термин PIN происходит от сокращенного названия п/п структуры этого устройства, где п/п материал с собственной (I) проводимостью используется между *p-n* переходом этого диода. Прежде чем вернуться к обсуждению детекторов света, дадим ряд определений тех терминов, которые будут использоваться в этой главе, а многие - и до конца книги. Ряд терминов взят из физики твердого тела.

5.2. Определения

Фотопроводящий детектор — детектор фотонов (с внутренним фотоэффектом), демонстрирующий повышенную проводимость при падении лучистой энергии (он называется также *фоторезистором*).

Фотогальванический детектор — детектор фотонов с *p-n* или *p-i-n* переходом, преобразующий лучистую энергию непосредственно в

электрическую; он называется также *фотодиодом*.

Отношение сигнал/шум (D^*) — относительная мера чувствительности, используемая для сравнения детектирующей способности различных детекторов. D^* — отношение сигнал/шум, измеренное на определенной электрической частоте в полосе 1 Гц, когда лучистая энергия падает на активную область детектора.

Чувствительность отклика — величина, определяющая выходной сигнал, падающей на детектор. Эта величина, полученная в области максимума спектральной характеристики, называется *пиковой чувствительностью отклика*. Она является функцией активной области детектора, длины волны (сигнала излучения) и параметров цепи.

Эквивалентная шумовая мощность (NEP) - количество лучистой энергии сигнала, падающего на активную область детектора, требуемое для получения единичного отношения сигнал/шум. Она указывает на минимальный уровень детектируемого излучения; чем ниже уровень NEP, тем лучше характеристики детектора.

Удельное сопротивление — сопротивление квадратного тонкопленочного детектора (длина L и ширина W которого одинаковы). L — расстояние между электродами, W — длина активной области детектора. Удельное сопротивление является функцией детекторного элемента и уровня энергетической освещенности.

СКВ напряжение или **ток сигнала** — электрический выход (напряжения или тока), который когерентен с монохроматическим (или обладающим свойствами излучения абсолютно черного тела) входным сигналом лучистой энергии. Он является функцией электрической частоты, мощности, спектральных характеристик, рабочей температуры и других параметров цепи, таких как сопротивление нагрузки и напряжение смещения.

СКВ напряжение или **ток шума** — электрический выход (напряжения или тока), который некогерентен с входным сигналом лучистой энергии, обычно измеряется в отсутствие сигнала излучения, падающего на

детекторный элемент, и имеет отношение к области детектора. Он является функцией частотной характеристики, эквивалентной шумовой полосы, рабочей температуры и других параметров цепи, таких как сопротивление нагрузки и, в некоторых случаях, телесного угла детектора и фоновой температуры.

Темповое сопротивление - отношение напряжения постоянного тока на детекторе к постоянному току через него, при условии, что излучение не падает на детектор.

Темповой ток — ток, измеренный в цепи детектора в рабочем режиме, при условии, что излучение не падает на детекторный элемент. Для хорошего фотодиода темновой ток должен быть < 10 нА [5.1].

Напряжение смещения — напряжение, приложенное к цепи детектора, обычно напряжение постоянного тока. Иногда это напряжение называется *оптимальным смещением*, для тех значений, что дают оптимальное отношение сигнал/шум, и *максимальным смещением*, для тех значений, что дают максимальное напряжение выходному сигналу. Иногда оно называется *обратным смещением*, когда оно приложено кр-п переходу кристалла детектора в обратном направлении, для увеличения скорости или отклика, или для увеличения отклика в области длинных волн.

Фоновая температура — эффективная температура всех источников радиации, наблюдаемых детектором, исключая сигнал источника.

Спектральная характеристика — в большинстве случаев она показана как зависимость вида $D^*(\lambda)$, обычно представлена кривой, показывающей зависимость уровня сигнала от длины волны падающей лучистой энергии.

Сопротивление нагрузки — элемент сопротивления, включенный последовательно с детекторным элементом и напряжением смещения; как правило согласован с темновым сопротивлением детектора.

Напряжение разомкнутой цепи — напряжение постоянного тока, генерируемое фотогальваническим детектором, при включении на нагрузку с

высоким импедансом.

Постоянная времени - измерение скорости отклика детектора при условии, что на детектор подана последовательность прямоугольных импульсов излучения. **Постоянная времени нарастания** — время, необходимое для напряжения сигнала достичь уровня, равного 0,63 от его асимптотического значения. **Постоянная времени спада** — время, необходимое для напряжения сигнала снизиться до уровня, равного 0,37 от его асимптотического значения. Оно может быть измерено путем определения такой частоты прерывания (светового потока), при которой уровень сигнала достигнет 0,707 от максимального значения.

Время нарастания и время спада — время (в сек), необходимое отклику сигнала увеличить амплитуду сигнала от 10 до 90% или уменьшить ее от 90 до 10% от максимально зафиксированного значения сигнала. Это происходит тогда, когда на вход детектора подан сигнал лучистой энергии.

Длина волны отсечки — точка со стороны длинных волн, в которой чувствительность отклика детектора падает до определенной величины (в %) от пиковой чувствительности отклика (обычно до 20 или 50% пиковой чувствительности отклика).

Все вышеприведенные определения были взяты из издания «1998 New England Photoconductor» на Web-сайте www.netcorp.ici.net, см. [5.2].

Коэффициент шума (F или f) — $f = S/N_{in} / S/N_{out}$ для оцениваемого устройства, где f — безразмерное число. Коэффициент шума часто дается в дБ и определяется из формулы $F_{dB} = 10 \log(f)$.

Квантовый предел — граница того, что предельно достижимо для определенной линии связи. Обычно устанавливается в терминах минимального числа фотонов на бит, позволяющего детектору света достичь заданного уровня BER при использовании определенного формата модуляции и типа приемника.

Шум Джонсона - тепловой шум, см. [5.1].

Важные постоянные

Джоуль: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с}$, [5.3]

Заряд электрона (q): $1,6 \times 10^{-19}$ (Кл)

Постоянная Больцмана: $1,38 \times 10^{-23}$ (Дж/°К), [5.4], или -228,6 дБВт, или -198,6 дБм [5.5].

Постоянная Планка: (h) $6,626 \times 10^{-34}$ (Дж·с), [5.3]

Используя постоянную Планка, можно получить следующую формулу, справедливую для диапазона 1500 нм:

$$1 \text{ мВт} = 7,5 \times 10^{15} \text{ фотонов/с,}$$

(из работы [5.6], с. 270, формула (5.1)).

5.3. Необходимые соотношения

Наиболее часто для ВОСП используются PIN-фотодиоды и лавинные фотодиоды (APD).

Фотодиод может быть рассмотрен как счетчик фотонов. Энергия фотона E зависит от частоты и определяется формулой:

$$E = h\nu, \quad (5.1)$$

где h — постоянная Планка (см. выше), а ν — частота в Гц. E — измеряется в Вт·с или кВт·час.

Принятая мощность в оптической области может быть измерена путем подсчета числа фотонов, принятых детектором света в секунду. Мощность в Вт можно затем получить, умножая это число на энергию фотона из формулы (5.1). См. также соотношения, данные в конце разд. 5.2 для конвертирования мВт в фотоны/с.

Квантовая эффективность — эффективность преобразования оптической мощности в электрическую, выраженная в %, определяется *квантовой эффективностью* фотодиода η , которая является мерой среднего числа электронов, освобожденных каждым падающим фотоном.

Чувствительность фотодиода также может быть выражена в практических единицах: амперах фотодиодного тока на ватт падающего освещения:

$$\eta(\%) = 1,24 \times 10^5 R / \lambda \quad (5.2)$$

где R — чувствительность отклика в амперах на ватт (А/Вт), а λ — длина волны светового сигнала в нм.

При работе в идеальных условиях отражения, кристаллической структуры и внутреннего сопротивления, оптимально спроектированные высококачественные кремниевые фотодиоды способны достичь квантовой эффективности порядка 80%. Квантовая эффективность в 100% - недостижима.

Источник: Web-сайт www.west.net/~centro/tech2.htm (см. [5.7]).

Для инженера ВОСП *чувствительность отклика* более важный параметр при работе с фотодиодными детекторами. Чувствительность отклика выражается в А/Вт или в В/Вт и иногда называется просто *чувствительностью*. Чувствительность отклика является отношением среднеквадратического (СКВ) значения выходного тока или напряжения фотодетектора к среднеквадратическому (СКВ) значению электрической мощности.

Другими словами, чувствительность отклика является мерой электрической мощности, которую мы можем ожидать на выходе фотодиода, отданной определенной, падающей на вход, световой мощностью сигнала. Для фотодиода чувствительность отклика R связана с длиной волны светового потока λ и квантовой эффективностью η , той частью падающих фотонов, которые производят пары электрон-дырка. Следовательно,

$$R = \eta \lambda / 1234 \text{ (А/Вт)} \quad (5.3)$$

где λ — измеряется в нм.

Чувствительность отклика может быть также связана с зарядом электрона q следующим выражением:

$$R = \eta q / h\nu \quad (5.4)$$

где $h\nu$ — энергия фотона, см. (5.1), а q - заряд электрона, $1,6 \times 10^{-19}$ (Кл).

Эквивалентная шумовая мощность (NEP) — является минимальной детектируемой световой мощностью фотодиода. Эта минимальная падающая на фотодиод мощность, требуемая для генерации фототока, равного полному шумовому току фотодиода, определяется как эквивалентная шумовая мощность. NEP вычисляется из следующего соотношения:

$$NEP = \text{шумовой ток (А)}/\text{чувствительность отклика (А/Вт)}. \quad (5.5)$$

NEP зависит от полосы пропускания измерительной системы. Для устранения этой зависимости, величина NEP делится на квадратный корень из полосы пропускания. Это дает величину NEP в единицах Вт/Гц^{-1/2}. Учитывая, что преобразование фотодиодом световой мощности в ток, зависит от длины волны излучения, мощность NEP приводится с указанием определенной длины волны. Как и чувствительность отклика, NEP является нелинейной функцией диапазона длин волн.

Шум. Прежде чем мы окунемся в мир шума, давайте примем в качестве утверждения, что фототок I_p — прямо пропорционален падающей оптической мощности P_{in} . Это можно выразить следующим образом:

$$I_p = RP_{in} \quad (5.6)$$

где R — чувствительность отклика (см. выражение (5.3)).

Существуют два основных механизма шума, с которыми мы имеем дело при анализе APD и PIN-диодов (детекторов света), а именно:

1. Дробовой шум.
2. Тепловой шум (называемый в некоторых текстах также шумом Джонсона).

Выражение (5.6) не учитывает наличия шума в системе. Ясно, что в любой схеме есть шумы. В случае с детекторами света шум может быть вызван флуктуацией тока, влияющей на характеристики приемника. Однако выражение (5.6) остается справедливым, если рассматривать ток I_p как среднее значение тока.

В работе [5.1] приведено следующее выражение для расчета дробового

шума (σ):

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f \quad (5.7)$$

где q — заряд электрона, I_d — шум темнового тока, Δf — полоса частот приемника.

Из выражения (5.7) можно получить соотношение для вычисления тока дробового шума (I_s):

$$I_s = [2qI_d\Delta f]^{1/2} \quad (5.8)$$

где I_d — утечка теплового тока (А) [5.7].

Тепловой шум вносит свой вклад за счет шунтирующего, последовательного и нагрузочного сопротивлений. Тепловой шум I_t может быть вычислен с помощью следующего выражения:

$$I_t = [4kT\Delta f / R_{es}]^{1/2} \quad (5.9)$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура в °К, R_{es} сопротивление (которое вносит вклад в тепловой шум) в Ом, Δf — полоса частот [5.7].

В книге [5.1] приведено следующее выражение для вычисления теплового шума (в обозначениях оригинала)

$$\sigma_T^2 = (4k_B T / R_L) f_n \Delta f \quad (5.10)$$

где σ_T — тепловой шум в Вт/Гц, f_n - коэффициент, благодаря которому тепловой шум позволяет учесть вклад R_L — сопротивления нагрузочного резистора и различных сопротивлений в предусилителе и основном усилителе, k_B — постоянная Больцмана.

Отношение сигнал/шум (S/N или SNR). Ниже мы рассмотрим только SNR в PIN-диодах. Для любого устройства

$$\text{SNR} = \text{средняя мощность сигнала} / \text{мощность шума} \quad (5.11)$$

Известно, что электрическая мощность зависит от квадрата тока. Из выражения (5.6) можно получить $I_p = RP_{in}$. Эта величина может быть использована в качестве числителя в (5.11). Комбинируя выражения (5.7) и (5.10), можно сформировать знаменатель (5.11). В результате окончательно

получим:

$$SNR = R^2 P_{in}^2 / [2q(RP_{in} + I_d)\Delta f + 4(k_B T / R_L) f_n \Delta f] \quad (5.12)$$

где $R = \eta q / h\nu$ — чувствительность отклика для PIN-диода.

В большинстве случаев влияние теплового шума доминирует в характеристике приемника, когда он имеет много большее значение, чем дробовой шум. В этом случае, исключив член, ответственный за дробовой шум, из выражения (5.12), получим отношение SNR, зависящее только от теплового шума, в виде:

$$SNR = R_L R^2 P_{in}^2 / 4k_B T f_n \Delta f \quad (5.13)$$

Время отклика. Как мы знаем, современные ВОСП передают информацию путем представления двоичной 1 в виде наличия светового импульса, а двоичный 0 в виде его отсутствия (отсутствие импульса не означает отсутствия тока, ЛД имеют смещение, поэтому и при логическом 0 имеют небольшой ток). Исключительно важными параметрами в этом процессе являются *время нарастания* и *время спада импульса* (см. рис. 4.8). Время нарастания определяет максимально допустимую для данного устройства скорость передачи. Время нарастания можно оценить по следующей формуле:

$$T_r = \ln 9 (\tau_{tr} + \tau_{RC}) \quad (5.14)$$

где τ_{tr} — *переходное время*, а τ_{RC} - постоянная времени эквивалентной RC-цепи.

Так как в выражении используется постоянная времени RC, важное влияние оказывает и соответствующая емкость устройства. Внутренняя емкость обратно пропорциональна толщине обедненного слоя [5.6]. Конструкторы фотодиодов обычно стараются сделать обедненный слой как можно шире, для максимизации квантовой эффективности, но это увеличивает переходное время, необходимое носителям для прохода через этот слой. Если носители в обедненном слое находятся под действием поля напряженностью в несколько киловольт, их максимальная скорость

составляет около 8×10^6 см/с для электронов и вдвое меньше - для дырок. Типичный PIN-диод имеет ширину обедненной зоны порядка 20 мкм. Ее вклад в величину постоянной времени при условии конечной подвижности носителей - 0,2 нс (см. [5.6]).

При скоростях порядка 1 Гбит/с, могут генерироваться паразитные электрические составляющие, влияющие на постоянную времени RC, что ограничивает максимально поддерживаемую скорость передачи.

Числовые значения τ_r и τ_{RC} зависят от конструкции детектора и могут меняться в широких пределах. Ширина полосы (определяющая скорость передачи) следующим образом зависит от этих двух параметров [5.1]:

$$\Delta f = [2\pi(\tau_r + \tau_{RC})]^{-1} \quad (5.15)$$

Следует заметить, что установка напряжения смещения влияет на время нарастания. Чем выше напряжение, тем меньше время нарастания. Для хорошего фотодиода время нарастания должно находиться в диапазоне десятых долей наносекунды. В зависимости от конструкции оно составляет около 0,2-1 нс для кремниевых фотодиодов и 0,04-0,5 нс для хорошо спроектированных фотодетекторов типа InGaAs.

5.4. PIN-фотодиоды

Существуют несколько типов фотодетекторов, которые могут быть использованы в качестве приемников света в ВОСП. Однако только два из них наиболее привлекательны для проектировщиков ВОСП. Это кремниевые PIN-диоды и InGaAs PIN-диоды. На рис. 5.1(а) показана кривая чувствительности отклика в зависимости от длины волны для кремниевого фотодиода, а на рис. 5.1(б) — кривая чувствительности отклика в зависимости от длины волны для фотодиода типа InGaAs. Из рисунков видно, что кремниевые фотодиоды могут использоваться в приложениях, работающих в

диапазоне коротких длин волн (850 нм), тогда как фотодиоды типа InGaAs - в приложениях, работающих в диапазонах длинных волн 1310 и 1550 нм.

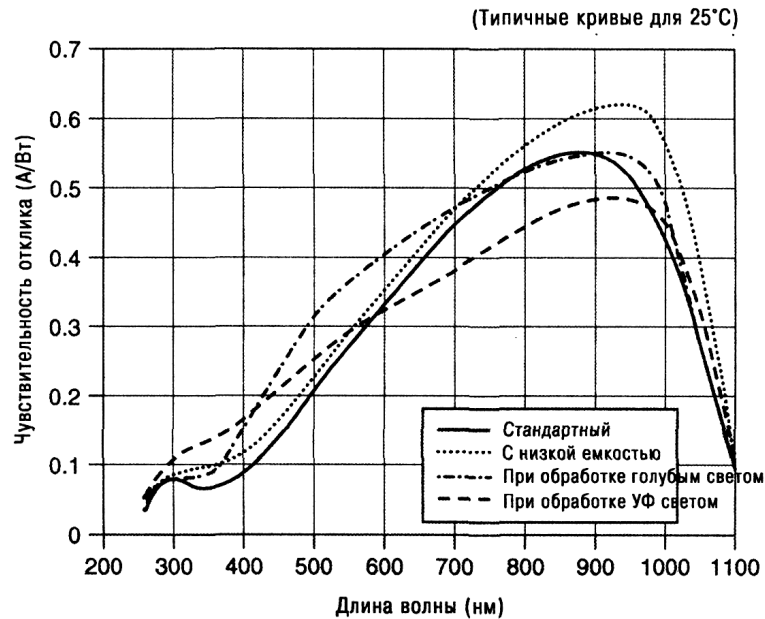


Рис. 5.1(а). Зависимость чувствительности отклика от длины волны для кремниевых фотодиодов. (С разрешения компании Silicon Sensors, см. [5.9])

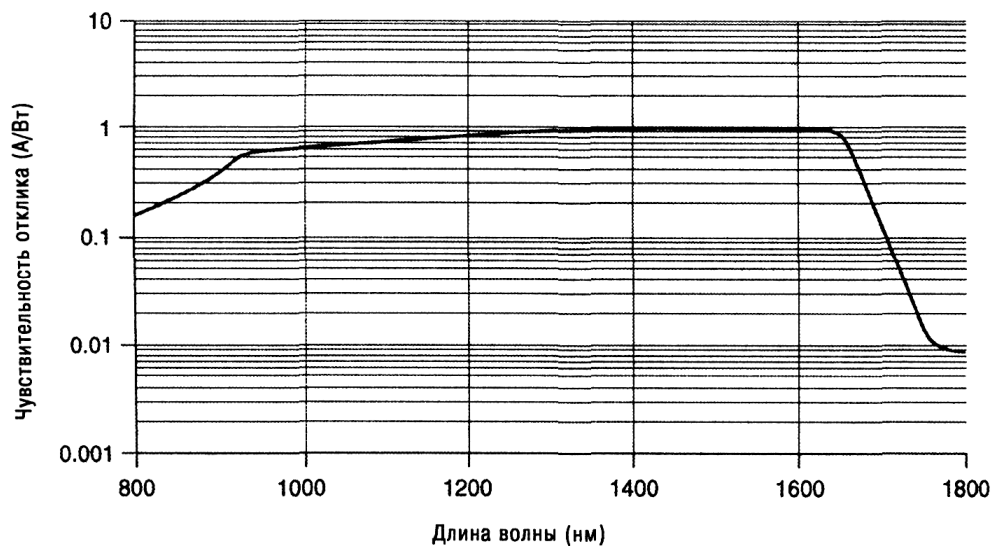


Рис. 5.1(б). Зависимость чувствительности отклика от длины волны для фотодиодов типа InGaAs. (С разрешения компании Silicon Sensors, см. [5.8])

5.4.1. Конструкция детектора на основе кремниевого фотодиода

Кремниевые фотодиоды производятся по технологии, аналогичной технологии ИС в том, что они выращиваются на одной кремниевой пластине. Кремниевый фотодиод, однако, требует кремний более высокой чистоты, так

как чистота определяет его удельное сопротивление (величину обратную удельной проводимости, измеряется в единицах Сименс/см, об этом параметре см. [5.3]). Чем выше степень очистки кремния, тем выше удельное сопротивление фотодиода.

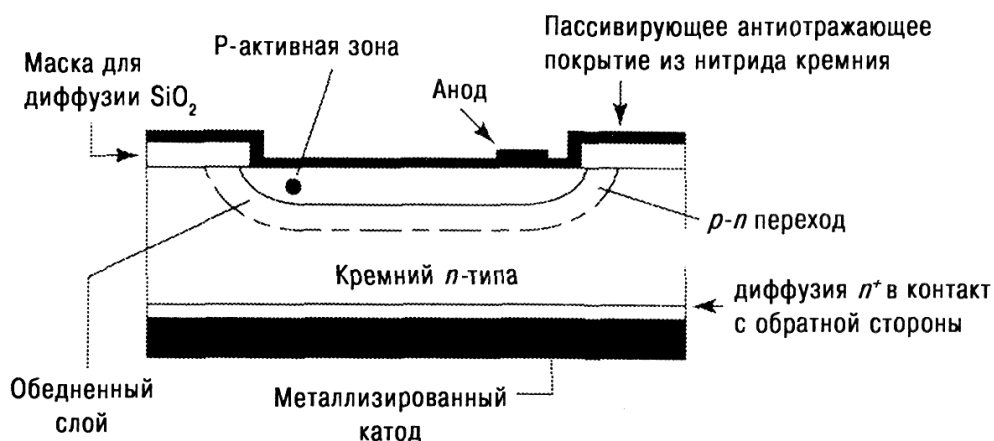


Рис. 5.2. Поперечное сечение кремниевого фотодиода. (Взято из материала на Web-сайте [5.7]).

На рис. 5.2 показано поперечное сечение кремниевого фотодиода. Основным материалом является кремний *n*-типа. Существует также тонкий слой *p*-типа на фронтальной поверхности прибора. Его формирование осуществляется путем тепловой диффузии или ионной имплантации соответствующего легирующего материала. Таким материалом обычно является бор. *p-n* переход является интерфейсом между слоем *p*-типа и кремнием *n*-типа. Существует небольшой металлический контакт, нанесенный на фронтальную поверхность фотодиода. Вся обратная сторона фотодиода покрыта металлом, используемым в качестве контакта. В привычных «диодных» терминах фронтальный контакт - это анод, а контакт с обратной стороны - катод. Активная область фотодиода покрывается либо нитридом кремния, диоксидом кремния, либо монооксидом кремния и служит антиотражающим покрытием. Толщина этого покрытия оптимизируется под определенную полосу длин волн.

Фотодиодные переходы, по сравнению с обычными *p-n* переходами,

необычны тем, что верхний слой p -типа очень тонок. Существует соотношение между толщиной этого слоя и рабочей длиной волны, детектируемой прибором. Кремний имеет *обедненный слой* электрических зарядов вблизи p - n перехода. Прикладывая обратное напряжение смещения на такой переход, можно изменять глубину обедненного слоя. Говорят, что диод *полностью обеднен*, если обедненный слой достиг обратной стороны диода. Обедненный слой особенно важен для характеристик фотодиода благодаря тому, что в он большой степени определяет чувствительность к световому излучению.

Мы уже отмечали, что емкость p - n перехода зависит от толщины изменяемого обедненного слоя. Напряжение смещения управляет толщиной этого слоя. С увеличением степени обеднения эта емкость уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто состояние полного обеднения. На рис. 5.3 показана зависимость емкости от напряжения смещения для диодов различной площади.

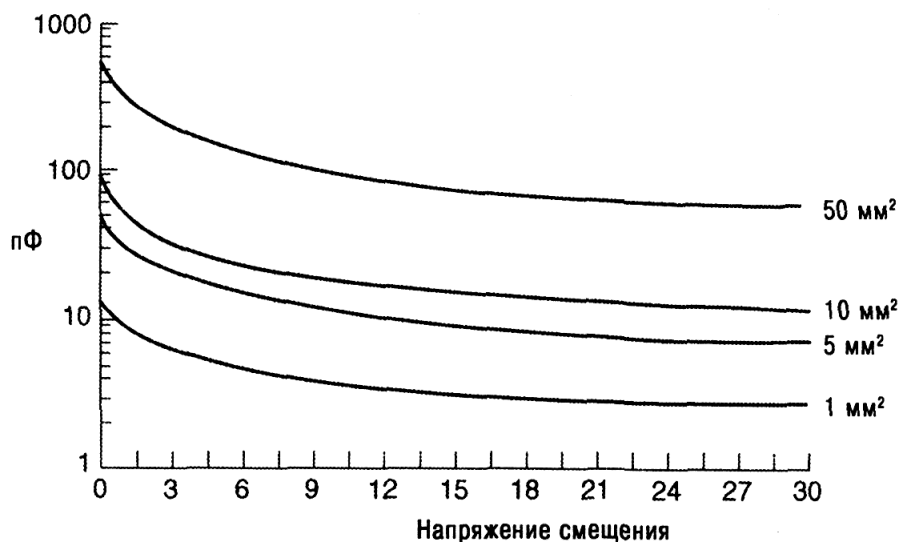


Рис. 5.3. Зависимость емкости кремниевого фотодиода от его площади и напряжения смещения. (Взято из материала «A Primer on Photodiode Technology» на Web-сайте, см. [5.7])

Пары электрон-дырка формируются, когда свет поглощается в активной области. В ней электроны отделяются и проходят в область n -типа,

а дырки - в область p -типа. Это приводит к возникновению тока, генерируемого падающим светом. Такая миграция электронов и дырок в области их предпочтения называется *фотогальваническим эффектом*.

Генерируемый ток, обычно определяемый как ток короткого замыкания, линейно зависит от света, излучаемого на активную область. Этот ток может изменяться в достаточно широком диапазоне, по крайней мере на 7 порядков. Амплитуда такого тока обозначается как I_{sc} . Он мало меняется под действием температуры - меньше 0,2% на градус Цельсия для видимого света.

Определение полярности напряжения двух выводов фотодиода: анода и катода основана на том, что существует малое прямое сопротивление (при положительном аноде) и большое обратное сопротивление (при отрицательном аноде). Как правило кремниевый диод имеет отрицательное смещение на активной области, которая является анодом, или положительное смещение на обратной стороне диода, которая является катодом. В условиях нулевого смещения и при фотогальваническом режиме работы генерируемый ток или напряжение соответствуют прямому включению диода. Следовательно, генерируемая полярность противоположна той, что требуется в режиме смещения.

5.4.2. Обзор фотодиодных детекторов на основе $InGaAs$

На рис. 5.4 приведена обобщенная схема PIN-фотодиода на основе $InGaAs$. Этот тип диодов используется как фотодетектор для больших длин волн (в диапазонах 1310 и 1550 нм).

Из рис. 5.4 видно, что слои состоят из материала InP для p -слоя, материала $InGaAs$ для i -слоя и материала InP для n -слоя. Так как ширина запрещенной зоны для InP равна 1,35 эВ, InP прозрачен для света с длиной волны больше 0,92 мкм. В отличие от этого, ширина запрещенной зоны для i -слоя, состоящего из материала $InGaAs$, равна 0,75 эВ. Эта величина соответствует длине волны отсечки 1650 нм. Следовательно, средний слой из материала

InGaAs, поглощает длины волн в области 1300-1600 нм. Это пример гетероструктурного фотодиода (используемого в качестве детектора), который полностью устраняет его диффузную компоненту, так как фотоны поглощаются только в обедненном слое. Этот тип PIN-диодов имеет очень хорошие характеристики во втором и третьем окнах прозрачности. Так, можно ожидать от них значений чувствительности отклика на уровне 0,6 — 0,9 А/Вт и квантовой эффективности на уровне 60-70%.

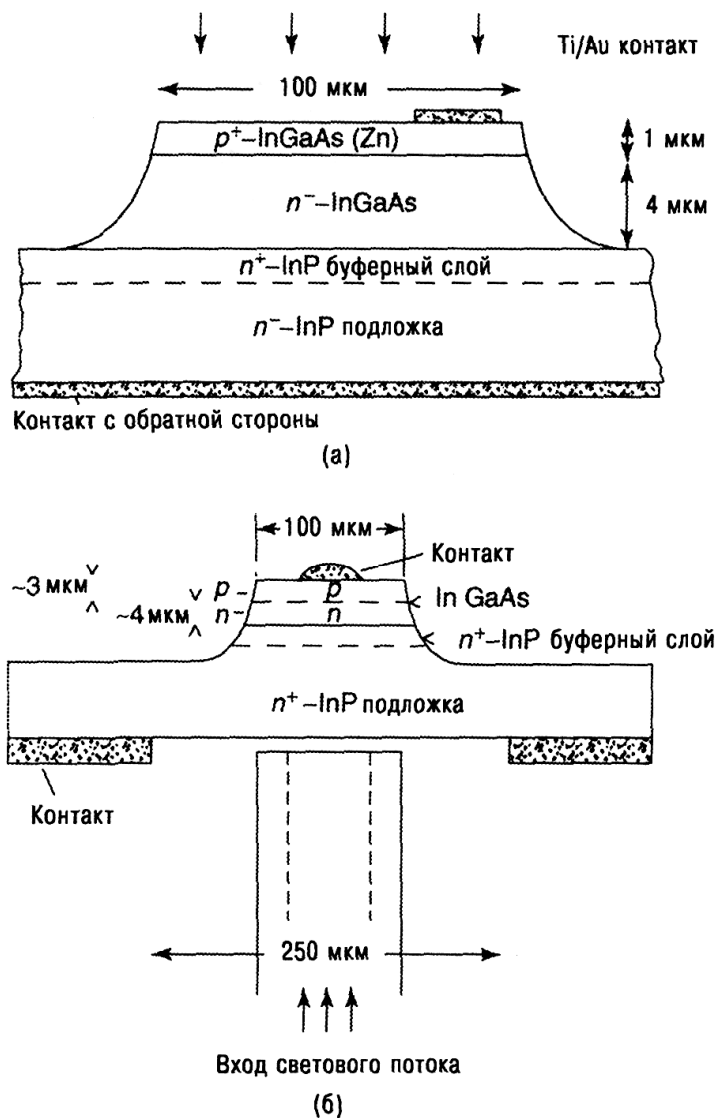


Рис. 5.4. Обобщенная схема PIN-диодного детектора на основе InGaAs. (а) вход с фронта; (б) вход с подложки (с тыла). (С разрешения ITU, см. [5.10], рис. 3.18, с. 52)

5.4.3. Лавинные фотодиоды (APD)

Фотодиод типа APD представляет из себя PIN-диод с усилением. На рис. 5.5 схематически представлено поперечное сечение типичной структуры APD. Из рисунка видно зону поглощения А и зону умножения М. Поперек зоны А приложено электрическое поле E , которое разделяет фотогенерируемые дырки и электроны и забрасывает один носитель в зону умножения. Эта зона М представляет собой область высокой электрической напряженности, способной обеспечить усиление внутреннему фототоку за счет ударной ионизации. Эта усилительная зона достаточно широка, чтобы обеспечить полезное усиление М, порядка 100 (20 дБ) для кремниевых APD и 10-40 для германиевых и InGaAs APD. Кроме того, способность данного поля к умножению носителей должна позволить достичь эффективного усиления и при напряженности поля ниже напряжения пробоя для данного диода.

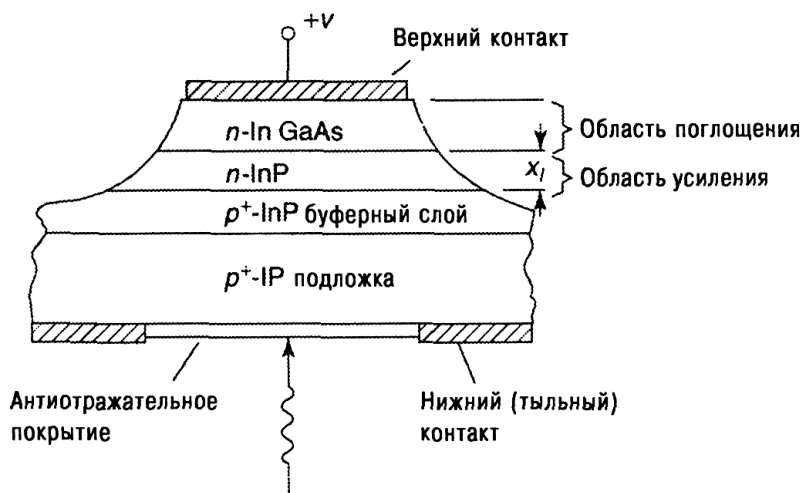


Рис. 5.5. Схема поперечного сечения структуры APD. (С разрешения ITU, см. [5.10])

5.4.3.1. Рабочие параметры APD

Благодаря своему внутреннему усилению фотоэлектрического сигнала, APD отличается от PIN-фотодиодов, которые не имеют усиления.

Ток выходного сигнала / APD дается выражением:

$$I_s = MR_0(1)P_s \quad (5.16)$$

где $R_0(1)$ — внутренняя чувствительность отклика APD при усилении $M = 1$ и длине волны λ ; M - усиление APD и P_s — падающая оптическая мощность.

Усиление M является функцией обратного напряжения V_R на APD и меняется с уровнем приложенного напряжения смещения. Вид типичных кривых зависимости усиления от напряжения для кремниевого APD, изготовленного компанией PerkinElmer, приведен на рис. 5.6.

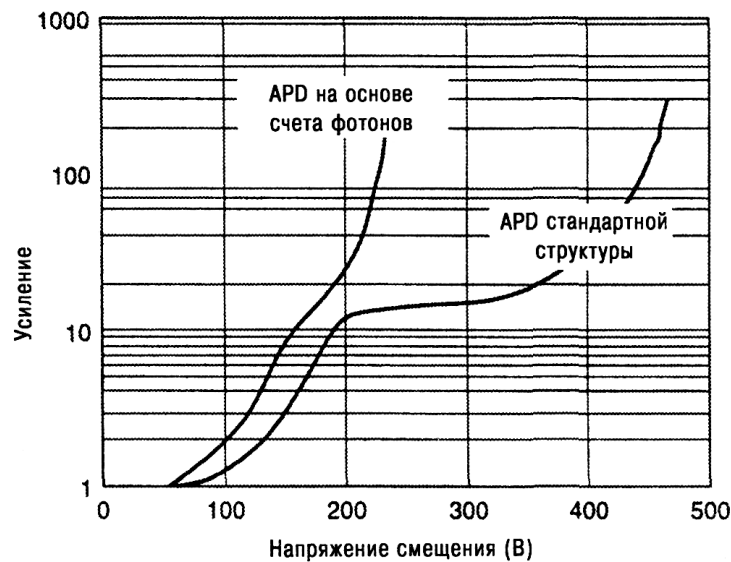


Рис. 5.6. Типичные кривые усиление-напряжение для кремниевых APD. (Взято из руководства «Avalanche Photodiodes: A user Guide» (рис. 2) компании PerkinElmer, см. [5.11])

Спектральный шум является ключевым параметром при выборе APD. Как и другие типы детекторов, APD обычно работает в одном из двух режимов: а) детекторный шум ограничен при низких уровнях мощности или б) дробовой шум фотонов ограничен при высоких уровнях мощности. APD работает с обратным смещением. Дробовой шум и ток утечки APD ограничивают чувствительность при низких уровнях светового потока. Этот случай отличается от PIN-детектора тем, что ток утечки материала подложки I_{DB} умножается на коэффициент усиления M , характерный для APD. В этом случае общий ток утечки I_D равен:

$$I_D + I_{DS} + I_{DB}M \quad (5.17)$$

где I_{DS} — ток утечки по поверхности.

Характеристики APD ухудшаются под действием избыточного коэффициента шума (F) по сравнению с PIN-диодами. Полный ток спектрального шума для APD, в условиях измерения темнового тока, определяется выражением

$$i_N = \left[2q(I_{DS} + I_{DB}M^2F)B^{1/2} \right] \quad (5.18)$$

где q — заряд электрона, а B — ширина полосы частот системы.

При более высоких уровнях сигнала, происходит переход к режиму ограниченного дробового шума фотонов, где чувствительность APD ограничена дробовым шумом фотонов, вызванным током, генерируемым оптическим сигналом. Полный APD-шум $i_{N(total)}$ равен среднеквадратичному значению детекторного шума и сигнального дробового шума в присутствии светового излучения. Полный APD шум может быть оценен следующим выражением:

$$i_{N(total)} = \left[2q \left(I_{DS} + (I_{DB}M^2 + R_0(1)M^2P_s)F \right) B \right]^{1/2} \quad (5.19)$$

где F — коэффициент избыточного шума, B — ширина полосы частот системы, M — коэффициент умножения, I_{DS} — ток утечки по поверхности, I_{DB} -ток утечки материала подложки.

В руководстве [5.11] сообщается, что в отсутствии других источников шума, APD может обеспечить отношение сигнал/шум (SNR), которое в $F^{1/2}$ хуже, чем у PIN-детектора при той же квантовой эффективности. В случае, когда внутреннее усиление APD увеличивает уровень сигнала без значительного увеличения общего шума системы, APD может обеспечить лучшее общее отношение сигнал/шум системы, чем PIN-детектор.

Показатель NEP не может быть использован как единственная мера характеристики детектора, скорее нужно использовать отношение SNR, вычисленное при определенной длине волны и полосе пропускания, для того чтобы определить оптимальный тип детектора для заданных приложений. Нужно заметить, что оптимум SNR имеет место при таком значении M , при котором полный шум детектора равен входному шуму усилителя или сопро-

тивления нагрузки. Для кремниевых APD показатель M изменяется в диапазоне от 100 до 1000, а для германиевых и InGaAs APD он изменяется от 30 до 40. Оптимальное усиление зависит частично от коэффициента избыточного шума F детектора APD.

5.4.3.2. Типы APD

Фотодиоды, типа APD, изготавливаются для длин волн, лежащих в диапазоне от 300 до 1700 нм. Кремниевые APD могут быть использованы для длин волн в диапазоне от 300 до 1100 нм, германиевые APD покрывают область 800-1600 нм, а InGaAs APD - область 900-1700 нм.

InGaAs APD существенно дороже, чем германиевые, и могут иметь значительно более низкий ток, демонстрировать расширенную до 1700 нм спектральную характеристику и обеспечивать расширенную в область высоких частот характеристику при той же активной области.

5.4.3.3. APD с разделением процессов поглощения и умножения (SAM APD)

Обычные APD имеют ряд недостатков. Для достижения лавинного умножения (с коэффициентом M) требуется достаточно сильные электрические поля. Ввиду узости запрещенной зоны (для InGaAs - 0,75 эВ), существует большой ток утечки за счет туннельного эффекта, наблюдаемого при электрических полях, уровень которых ниже того, что требуется для достижения достаточного коэффициента умножения в данном материале.

Для решения этих проблем была принята структура *APD с разделением процессов поглощения и умножения* (SAM APD). При использовании этого подхода, выполнение процессов поглощения и умножения осуществляется в различных слоях APD. В этой структуре реализован также новый слой управления полем. Он состоит из умеренно легированного InP, для того чтобы поддержать низкий уровень электрического поля в слое поглощения InGaAs с одной стороны и высокий уровень электрического поля в слое

умножения InP - с другой. Это можно видеть на рис. 5.5 и 5.7.

Более широкая запрещенная зона InP (1,35 эВ) обеспечивает умножение без туннельного эффекта. Такие приборы работают на длинах волн выше 950 нм.

Структура SAM была использована практически во всех промышленно выпускаемых APD, применяемых для длинных секций. Однако, если рассмотреть детали реализации APD (отвлекаясь от факта использования всеми производителями указанного решения), то окажется, что они существенно отличаются от производителя к производителю. В отличие от PIN-диода, APD типа InGaAs/InP существуют во многих вариантах.

Еще одной проблемой в этом типе APD является *торцевой пробой*. Ключевым моментом в ослаблении торцевого пробоя является снижение интенсивности электрического поля в районе торцов этих приборов. Существует множество подходов к решению этой проблемы. Среди них:

- снижение плотности легирования у краев переходов;
- управление полным профилем заряда в слое управления полем;
- управление профилем перехода.

Другой проблемой при проектировании высокоскоростных устройств (> 2,5 Гбит/с) является обеспечение достаточно широкой полосы пропускания. Например, для операций на скорости 10 Мбит/с требуется ширина полосы как минимум 7-8 ГГц, чтобы иметь возможность поддержать работу с большим коэффициентом усиления. Максимальная чувствительность при этом обнаруживается при коэффициенте умножения M порядка 10. Этот коэффициент диктует иметь величину произведения коэффициента усиления на полосу пропускания на уровне 80 ГГц. Толщина эпитаксиального слоя и постоянная времени RC не ограничивает требуемую ширину полосы в 8 ГГц. Если APD не является элементом, ограничивающим ширину полосы в приемнике, то усиление оптимизируется по величине чувствительности (т.е. $M \sim 10$) и проектировщик может выбрать компромиссное значение низкого усиления при высоком произведении коэффициента усиления на полосу

пропускания, в результате чего динамический диапазон приемника будет улучшен. Приемники APD, спроектированные таким образом, могут иметь чувствительность на уровне -26 дБм при величине BER равной 10^{-10} . Эти приемники используют псевдоморфный GaAs транзистор с высокой подвижностью электронов (p-HEMT). Характеристики этого приемника демонстрируют улучшение чувствительности на 5-6 дБ по сравнению с характеристиками аналогичного приемника на основе PIN-диода. На рис. 5.7 схематически представлен механизм действия SAM APD.

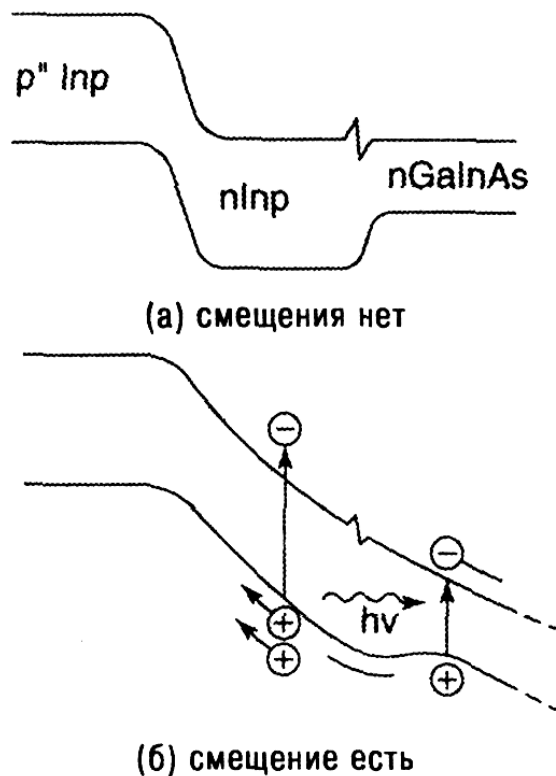


Рис. 5.7. Схематическое представление механизма действия SAM APD. (С разрешения компании Epitaxx, Inc., см. [5.12])

5.4.3.4. Рабочие параметры APD

Чувствительность отклика и усиление. Усиление APD, как показано на рис. 5.6, изменяется в зависимости от приложенного обратного напряжения. Более того, для большинства APD невозможно провести аккуратные измерения внутренней чувствительности отклика $R_0(1)$ при усилении с $M = 1$. В результате, бесполезно ожидать, что производитель

укажет типовое усиление и чувствительность при $M = 1$, для того чтобы охарактеризовать чувствительность отклика диода при заданном рабочем напряжении. Для характеристики отклика APD, его чувствительность отклика определяется в А/Вт при заданном рабочем напряжении. Следует заметить, что благодаря вариациям фактической кривой «усиление-напряжение» для каждого APD, соответствующее рабочее напряжение (для заданной чувствительности отклика) также меняется от одного APD к другому. В спецификации, следовательно, должен быть указан диапазон напряжений, внутри которого достигается определенная чувствительность отклика. Чувствительность отклика диода обычно указывается в следующем виде (на примере InGaAs APD):

$$R_{MIN} (1300 \text{ нм}) = 9,0 \text{ А/Вт}, V_{OP} = 50-90 \text{ В}, M = \sim 10.$$

Темновой ток и шумовой ток. Из выражения (5.19) можно видеть, что полный ток APD (и соответствующий ему спектральный шумовой ток) имеет смысл только тогда, когда он определяется при заданном рабочем коэффициенте усиления. Эти два параметра должны определяться при оговоренных уровнях чувствительности отклика. Используя в качестве примера InGaAs диод, ниже показано, как должны указываться в спецификации темновой ток и спектральный шумовой ток:

$$I_D (R = 9,0 \text{ А/Вт}) = 10 \text{ нА (макс)}, M \sim 10,$$

$$i_M (R = 6,0 \text{ А/Вт}, 1 \text{ МГц}, 1 \text{ Гц BW}) = 0,8 \text{ пА/Гц}^{1/2} \text{ (макс)}, M \sim 5.$$

5.4.3.5. Коэффициент избыточного шума

Благодаря статистической природе лавинного процесса, все APD генерируют избыточный шум. Он обозначается символом F . $F^{1/2}$ является коэффициентом, учитывающим превышение, вызванное статистическим шумом в токе APD (который является суммой умноженного тока фототока и умноженного темнового тока материала подложки), по сравнению с тем значением, которое могло бы быть, если бы этот коэффициент учитывал только пуассоновскую статистику дробового шума.

F является функцией коэффициента ионизации, вызванной носителями, k , где k , обычно, определяется как отношение вероятности ионизации по типу дырка к вероятности ионизации по типу электрон ($k < 1$). F может быть вычислен с помощью модели, разработанной Макинтайром (McIntyre) [5.13], которая учитывает статистическую природу лавинного умножения. Согласно ей, F можно вычислить так:

$$F = k_{EFF}M + (1 - k_{EFF})(2 - 1/M) \quad (5.20)$$

Из этого выражения видно, что чем меньше могут быть получены значения k и M , тем меньше будет коэффициент шума F . Переменная k_{EFF} означает эффективное значение коэффициента k для APD. Он может быть измерен экспериментально путем сопоставления зависимостей F от усиления, полученных экспериментально и по формуле Макинтайра. Измерения должны быть осуществлены в условиях использования светового воздействия. При известных коэффициентах ионизации и профиля электрического поля для структуры APD, можно теоретически рассчитать значение F .

Коэффициент ионизации k непосредственно связан с электрическим полем, приложенным перпендикулярно плоскости структуры APD. Он имеет малые значения для низких электрических полей (для кремниевых APD). Учитывая, что профиль электрического поля зависит от уровня легирования, можно утверждать, что коэффициент k также зависит от уровня легирования. Как профиль электрического поля, пересекаемый фотогенерируемыми носителями, так и носители, возникшие в результате последующей лавинной ионизации, могут меняться в соответствии с глубиной поглощения фотонов, которая в свою очередь зависит от структуры APD. Средняя глубина поглощения является функцией длины волны для полупроводников с непрямозонной запрещенной зоной, к которым относится кремний. Для этих типов полупроводников, коэффициент поглощения медленно меняется в зависимости от длины волны (в области длинных волн). Поэтому значения k_{EFF} и M таких кремниевых APD являются функциями длины волны для

некоторых легирующих профилей.

Формула Макинтайра, для $k < 0,1$ и $M > 20$, может быть аппроксимирована без большой потери точности:

$$F = 2 + kM \quad (5.21)$$

Некоторые производители APD для вычисления F используют эмпирическую зависимость вида:

$$F = MX, \quad (5.22)$$

где X определяется на основе логарифмически нормальной линейной аппроксимации измеренных значений F для заданных значений M . Эта аппроксимация обеспечивает для многих случаев достаточную точность, особенно для InGaAs и германиевых APD с высоким значением k .

В табл. 5.1 приведены типичные значения k , X и F для кремниевых германиевых и InGaAs APD.

Таблица 5.1

Типовые значения k , X и F для кремниевых, германиевых и InGaAs APD

| Тип детектора | Коэффициент ионизации (k) | Множитель X | Усиление избыточного шума (F) | Коэффициент (M) |
|---------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|
| Кремниевый | 0,02 | - | 150 | 4,9 |
| Кремниевый | 0,002 | - | 500 | 3,0 |
| Германиевый | 0,9 | 0,95 | 10 | 9,2 |
| InGaAs | 0,45 | 0,7-0,75 | 10 | 8,5 |

Замечание. Источником данных раздела 5.4.3, включая эту таблицу, является руководство в [5.11].

Отношение сигнал/шум для APD. В APD приемниках, используемых на практике, доминирующим является тепловой шум. Следовательно, если в APD тепловой шум много больше дробового шума, то

$$SNR = (R_L R^2 / 4k_B T_f \Delta f) M^2 P_m^2 \quad (5.23)$$

Если сравнивать приведенное выражение с аналогичным для PIN - диодных приемников, то окажется, что оно лучше в M^2 раз.

5.4.4. Применение APD

Для низкоскоростных систем (< 622 Мбит/с) использование APD не приносит значительного выигрыша по сравнению с PIN-диодными приемниками. Однако при более высоких скоростях, таких как 2,5 и 10 Гбит/с, улучшение чувствительности APD приемников может оказаться значительным по сравнению с PIN-диодными приемниками.

Для InGaAs/InP APD, предназначенных для систем ВОСП с большой длиной волны, можно получить улучшение по крайней мере в 7 дБ по сравнению с использованием PIN-диодных приемников на скорости 2,5 Гбит/с и улучшение (по сведениям на данный момент) 5-6 дБ на скорости 10 Гбит/с.

5.5. Оптические приемники

На рис. 5.8 представлена упрощенная блок-схема оптоволоконного приемника. PIN-диод или APD размещены на этом рисунке слева. Большую часть приемника составляют электрические схемы.

5.5.1. Электрические усилители, выход приемника

На рис. 5.8 показаны различные компоненты оптоволоконного приемника, где фотодиод (PIN-диод или APD) — только один из них. *Предусилитель* - другой ключевой элемент, который определяет характеристики приемника в целом. Выход сигнала, принятого фотодиодом, — это точка, где сигнал самый слабый и наиболее подвержен искажениям от действия шума. Этот сигнал является входным для предусилителя. Роль предусилителя — усилить сигнал для дальнейшей его обработки.

При проектировании предусилителя приходится идти на компромисс между высокой скоростью и чувствительностью. Входное напряжение предусилителя может быть увеличено путем использования большого нагрузоч-

ного сопротивления R_L . В этом случае часто используется схема с высоким импедансом (см. рис. 5.8(б)).

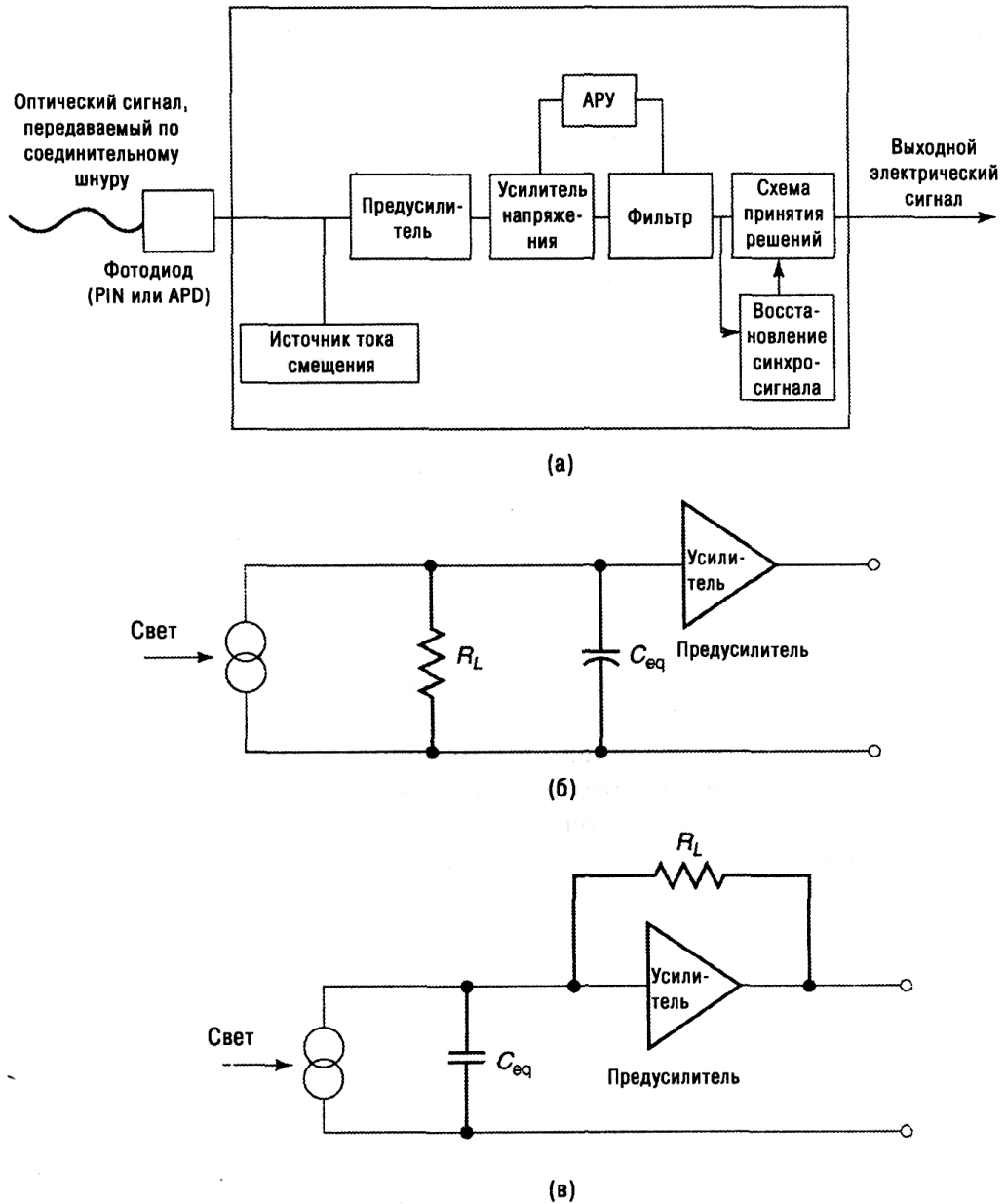


Рис. 5.8. (а) Упрощенная блок-схема функционирования приемника, (б) Упрощенная электрическая модель с высоким входным импедансом, (в) Трансимпедансный вход.

Большое значение R_L уменьшает тепловой шум и улучшает чувствительность приемника. Однако такое решение имеет свой недостаток - низкую полосу пропускания. Полоса частот приемника, как известно, определяется его самым низкочастотным компонентом. Если полоса частот

схемы приемника с высоким сопротивлением значительно меньше, чем требуется для данной скорости передачи, то он не может быть использован. Для преодоления этого недостатка, иногда используется схема выравнивания частотной характеристики (в сторону высоких частот). В этой схеме фильтр ослабляет низкочастотные составляющие больше, чем высокочастотные, что позволяет эффективно скорректировать (увеличить) полосу пропускания. Там, где чувствительность не столь важна, можно уменьшить R_L , чтобы увеличить полосу пропускания. Такое решение носит название *схемы с низким импедансом*.

На рис. 5.8(в) показана *схема с трансимпедансом*. Это решение позволяет получить большую полосу пропускания и высокую чувствительность. Здесь R_L расположен в цепи обратной связи инвертирующего усилителя. В этом случае R_L может быть достаточно большим, так как отрицательная обратная связь уменьшает эффективный входной импеданс пропорционально усилению G такого усилителя. Полоса пропускания такой схемы увеличивается также в G раз, по сравнению со схемой с высоким импедансом. Многие типы оптических приемников используют схему с трансимпедансом, благодаря ее большой ширине полосы и высокой чувствительности. Однако и здесь есть определенные вопросы, связанные со стабильностью петли обратной связи.

Следующими компонентами такого приемника являются усилитель напряжения с высоким коэффициентом усиления и низкочастотный фильтр. Коэффициент усиления усилителя управляется автоматически, с помощью схемы АРУ, для ограничения изменения среднего значения относительно фиксированного уровня, вне зависимости от средней оптической мощности, падающей на приемник. Фильтр нижних частот формирует импульс напряжения. Фильтр используется с целью уменьшения шума без внесения межсимвольных искажений. Этот фильтр также определяет ширину полосы пропускания приемника. Его полоса пропускания меньше, чем эквивалентная скорость передачи, тогда как полоса пропускания других компонентов

приемника проектируется так, чтобы быть больше эквивалентной скорости передачи.

Последним компонентом на рис. 5.8 является схема принятия решений. Восстановленные сигналы таймера обеспечивают синхронизацию и побитное таймирование. Схема принятия решения сравнивает выходное напряжение усилителя напряжения на выходе фильтра с пороговым уровнем и определяет, для каждого битового интервала, является ли принятый сигнал двоичной 1 или 0. Длительность битового интервала для формата NRZ равна $1/B$, где B — скорость передачи. Например, сигнал формата NRZ 1 Мбит/с имеет длительность битового интервала 1 мкс. Сигнал при скорости передачи в 1 Гбит/с имеет длительность 1 нс, а при скорости передачи в 10 Гбит/с — 0,1 нс или 100 пс.

Еще одна важная характеристика фотодиодного приемника - *динамический диапазон*. Допустим, что приемник спроектирован так, что оптимизированы чувствительность и ширина полосы. Один из таких приемников (ниже мы будем его обсуждать) работает на 10 ГГц, имеет порог, для BER 10^{-10} , порядка —34,0 дБм. Его динамический диапазон — 26 дБ. Это значит, что любой принятый сигнал больше, чем —8 дБм, будет перегружать приемник. Проектировщик системы может подойти к решению этой ситуации просто. Он поставит аттенюатор, так чтобы принятый сигнал всегда укладывался в динамический диапазон приемника.

5.5.2. Глазковая диаграмма

Использование глазковой диаграммы считается грубым, но быстрым, методом получения достаточно хорошей оценки качества принятого сигнала. На рис. 5.9(а) показана идеализированная глазковая диаграмма, без следов какого-либо ухудшения качества сигнала. Рис. 5.9(б) показывает прекрасную глазковую диаграмму реального сигнала, без ухудшения качества. В этом случае эксперимент проведен в лаборатории, где передатчик и приемник соединены непосредственно, с использованием соответствующего

аттенюатора. Глазковая диаграмма позволяет отображать на экране осциллографа две или больше двоичные последовательности одна поверх другой. Если ворота схемы принятия решений приемника в точности соответствуют битовому периоду двоичного потока, то мы получим картину глазковой диаграммы, приведенную на рис. 5.9(б). Она должна демонстрировать максимальное возможное открытие «глаз». Если глаза начинают закрываться, мы можем наблюдать картину, похожую на ту, что продемонстрирована на рис. 5.9(с).

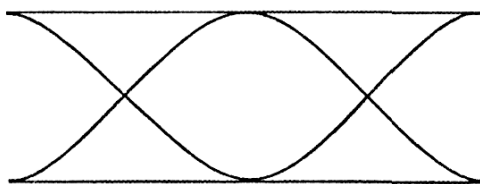


Рис. 5.9(а). Идеализированная глазковая диаграмма. Нет ухудшений сигнала.

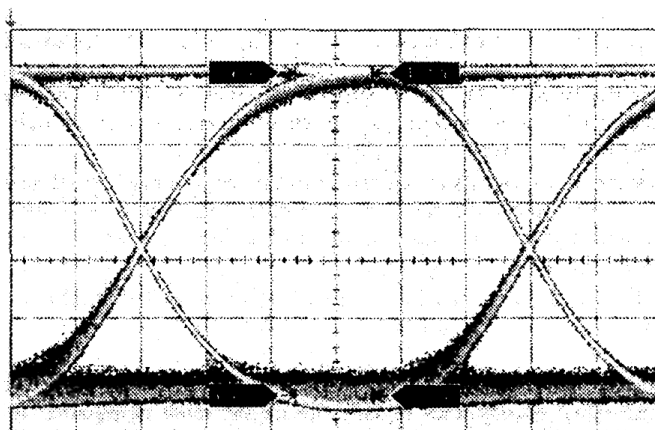


Рис. 5.9(б). Глазковая диаграмма сигнала со скоростью передачи 622 Мбит/с, формат NRZ, передатчик и приемник соединены непосредственно (выход на вход) с соответствующим аттенюатором.

Следующий комментарий будет полезен в интерпретации глазковой диаграммы:

- Высота от верха до низа глазковой диаграммы является мерой шума в сигнале. Как только линии становятся толще и мохнатее, схема оказывается больше подверженной шуму и можно ожидать ухудшения качества сигнала,

т.е. BER. Высота открытой части глазковой диаграммы является мерой запаса по шуму. Как только схема начнет ухудшать сигнал под действием шума, «глаза» начинают все больше закрываться.

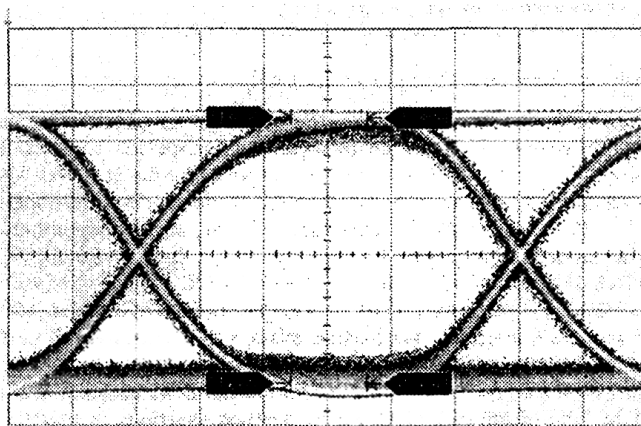


Рис. 5.9(в). Сигнал в чем-то ухудшенный, скорость 622 Мбит/с, формат NRZ, длина звена 15 км. Время показано по оси x, амплитуда сигнала - по оси y. Расстояние между двумя пересечениями оси времени соответствует 1 битовому периоду. (С разрешения компании Agilent Technologies, Inc.)

- Ширина сигнала в центральной части глазковой диаграммы является мерой накопленного джиттера (дрожания фазы). Если линии тонкие, как на рис. 5.9(а), то уровень накопленного джиттера мал. Чем шире линии в центре глазковой диаграммы, тем больше уровень джиттера.

- Расстояние между двумя точками пересечения оси времени дает относительную меру битового периода.

Иногда на дисплей осциллографа накладывается маска. Если сигнальные линии на дисплее остаются за границами маски, то схема считается приемлемого качества. Дисплей с маской служит качественной характеристикой уровня шума, джиттера, времен нарастания и спада и длительности битового импульса. Глазковая диаграмма дает качественные, а не точные количественные, оценки уровня качества.

Читатель может проконсультироваться по этому вопросу, если обратится к стандарту TIA/E1A-526-4A (см. [5.18]), который может служить

хорошим руководством по глазковым диаграммам.

5.5.3. Уровень принятого сигнала и BER

Один из первых шагов при проектировании звена ВОСП - установить пороговый уровень принимаемого сигнала, заданный характеристиками конкретного приемника. Для каждого типа приемника производитель дает кривую или семейство кривых, где представлена зависимость BER от уровня сигнала, выраженного обычно в дБм. Рассматриваемый пороговый уровень может изменяться от 10^{-9} до 10^{-12} , в зависимости от организации, исследователя или оператора сети/системы. Например, оператор Sprint устанавливает порог на уровне 10^{-12} , исследователь Agrawal - на уровне 10^{-9} [5,1], стандарт MIL-HDBK-415 [5.14] - на уровне 10^{-9} , стандарт ITU-T G.957 - на уровне 10^{-10} , а Telcordia TSGR [5.16] - на уровне 2×10^{-10} (интерфейс DSX). Мы предполагаем, что эти уровни соответствуют всей системе в целом для сигнала, переданного «из конца в конец». Следовательно, лежащая в основе ВОСП сеть, по которой передаются сигналы, рассчитанные на эти пороги, должна иметь значительно лучшие характеристики. Если мы представим, например, что число мультиплексных (ввода-вывода) и регенераторных секций, соединенных в тандемном соединении, чтобы пересечь континентальную часть США, равно 100, то для каждого звена в этом соединении потребуется BER порядка 2×10^{-12} для того, чтобы получить на приемном конце уровень BER порядка 10^{-10} , при условии случайных ошибок.

На рис. 5.10 показана спадающая кривая без каких-то фактических значений. Эта кривая похожа на траекторию воды, падающей с водопада. Значения BER приведены по оси ординат, а уровень мощности сигнала — по оси абсцисс (предполагаемая скорость - 10 Гбит/с). Грубо, экстраполируя другие значения уровня мощности сигнала, можно сказать, что увеличение уровня сигнала на 1 дБ, в области максимального градиента данной кривой, может улучшить ВЕК на два порядка. На рис. 5.11 показан уровень входной мощности типичного приемника, работающего на скорости 10 Гбит/с. На оси

ординат отложены значения BER для определенных значений входного уровня в дБм.



Рис. 5.10. Кривая с траекторией «водопада» отображает зависимость BER от уровня принятой мощности.

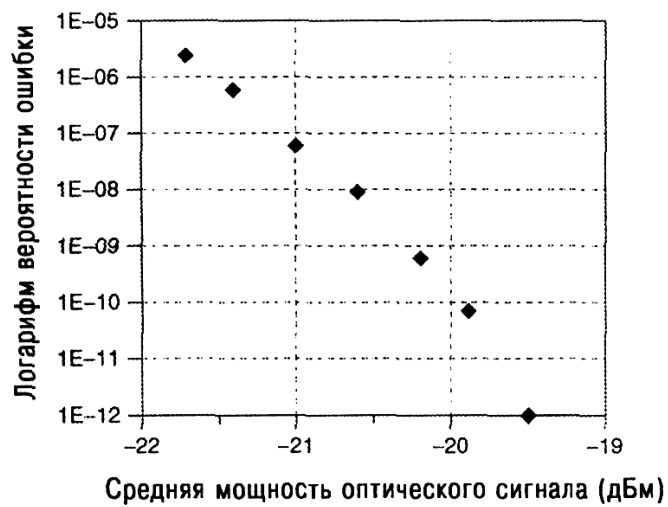


Рис. 5.11. Зависимость BER от уровня входной мощности в дБм для оптического приемника при скорости 10 Гбит/с с чувствительностью отклика 350 В/Вт. (С разрешения компании Discovery Semiconductor, см. [5.17])

Табл. 5.2 дает представление о предельных характеристиках для PIN-диодов и APD.

Уровни приема и значения BER для используемых скоростей передачи.

| Скорость передачи | BER | Уровень (дБм) | Комментарий |
|-------------------|---------------------|---------------|----------------|
| 155 Мбит/с | 1×10^{-10} | -33 | Alcatel, PIN |
| 2,5 Гбит/с | 1×10^{-10} | -26 | Alcatel, APD |
| 622 Мбит/с | 1×10^{-10} | -27 | Alcatel, PIN |
| 155 Мбит/с | 1×10^{-10} | -35 | Alcatel, PIN |
| 622 Мбит/с | 1×10^{-10} | -28 | ITU-T G.957 |
| 2,5 Гбит/с | 1×10^{-10} | -23 | Lucent, PIN |
| 2,5 Гбит/с | 1×10^{-10} | -32 | Lucent, APD |
| 155 Мбит/с | 1×10^{-10} | -38 | Fujitsu, PIN |
| 10 Гбит/с | 1×10^{-10} | -16,3 | Discovery, PIN |
| 10 Гбит/с | 1×10^{-10} | -26 | Epitaxx, APD |

5.6. Замечания по применению детекторов

Бюджет линии, рассмотренный детально в гл. 10, положен в основу проектирования оптических систем. Краеугольным камнем этого бюджета является оптический приемник. Системный инженер сначала устанавливает уровень BER для линии. На основе выбранного BER, который, вероятно, лежит между 10^{-10} и 10^{-12} , можно определить эквивалентную входную световую мощность, требуемую приемнику. Обычно это величина определяется в дБм.

Рассмотрим два условия: (1) короткая линия, (2) длинная линия. Для короткой линии инженер-проектировщик оптической системы должен поставить красный флажок и ответить на вопрос: «Может ли возникнуть такая ситуация, при которой на входе PIN-диода будет избыточная мощность, выводящая световой сигнал за пределы используемого динамического диапазона?» Параметры, приведенные в спецификации производителя, должны дать этот диапазон, указав допустимые минимальный и максимальный уровни сигнала. В данном случае нас интересует максимальный уровень сигнала. Если мы превосходим этот максимум, то нам нужно использовать для этой линии аттенюатор с определенным уровнем затухания, который

позволит привести световой сигнал к уровню, лежащему внутри динамического диапазона приемника.

В случае длинной линии возникает противоположная ситуация. Уровень мощности сигнала может оказаться недостаточен для достижения установленного требования на величину BER. В этом случае проектировщик линии может использовать несколько решений: укоротить линию (снизив, тем самым, ее потери), использовать оптический предусилитель, использовать оптическое волокно с меньшими потерями на единицу длины, использовать более чувствительный детектор (например, PIN-детектор) или заменить PIN-детектор на APD.

При проектировании может возникнуть проблема обеспечения требуемого уровня доступности системы, и придется учитывать тот факт, что PIN-диоды имеют большую наработку на отказ, чем APD. PIN-диоды к тому же дешевле, чем APD, значительно менее сложны, менее чувствительны к изменению температуры и более просты в обращении. Их наработка на отказ может быть в 10 раз выше, чем у APD. Если же мы рассматриваем агрегатные сигналы, то ситуация значительно усложняется.

Этот материал детально рассмотрен в гл. 10.

ГЛАВА 6 УХУДШЕНИЕ ПЕРЕДАЧИ СВЕТА

6.1. Введение

В начале гл.1 мы утверждали, что ВОЛС является линией либо с ограниченными потерями (затуханием), либо с ограниченной дисперсией. В этой главе мы детально рассмотрим причины этих потерь и дисперсию, а также то, какие меры можно принять, для того чтобы ослабить эти потери и дисперсию. В 1980-х и в начале 1990-х при проектировании ВОЛС к этим двум основным эффектам надо было приспособляться. В этом смысле процесс проектирования линии был достаточно прямолинеен.

С началом использования оптических усилителей — ОУ, а затем и систем WDM (а впоследствии и DWDM), возникли другие причины, приводящие к ухудшению характеристик систем. Они, конечно, существовали все время, или были такого малого уровня, что проектировщики могли их до некоторых пор полностью игнорировать. Другие же причины появились благодаря использованию новых технологий. К ним, например, относится *четырёх-волновое смешение* — ЧВС (FWM). Как только появляется второй канал, так появляется и ЧВС, хотя и, возможно, очень малого уровня.

Когда мы начали использовать ВОЛС, рабочие сигналы были достаточно низкого уровня: от -2 до $+3$ дБм. Одной из причин — было желание продлить жизнь лазерных диодов. Как только появились системы WDM, а, в особенности, DWDM, уровни сигналов возросли стократно. При объединении выхода лазерного передатчика с ОУ нужно было генерировать уровни сигналов порядка $+20$ дБм, чтобы компенсировать потери, вызванные использованием пассивных элементов систем WDM. Эти высокие уровни сигналов обострили многие причины ухудшений, так или иначе приводящие к деградации сигнала и характеристик в целом. Еще одним негативным фак-

тором явилось увеличение скорости передачи, учитывая, что потоки в 40 Гбит/с стали реальностью.

Ниже мы начнем с причин потерь уровня сигнала при его прохождении по оптоволокну. Существуют пути уменьшения потерь оптоволокну, такие как выбор приемлемого типа оптоволокну и рабочей длины волны. И, конечно, существует ряд компромиссов, которые приходится при этом учитывать. Дисперсия также существует в различном виде. Мы начнем с рассмотрения модовой дисперсии и обычной материальной дисперсии. Затем мы продолжим рассмотрением хроматической дисперсии, дисперсии поляризованной моды и дифференциальной задержки. Мы, наконец, рассмотрим нелинейные эффекты, эффекты, зависящие от поляризации, и другие специфические ухудшения, такие как самофльтрация и генерация оптических волн.

6.2. Потери или ослабление сигнала в оптическом волокне

Существуют четыре причины потерь в оптоволокну:

1. Собственные внутренние потери.
2. Потери, вызванные примесями (иногда называемые внешними потерями).
3. Рассеяние Рэлея.
4. Потери, вызванные несовершенством оптоволокну.

6.2.1. Собственные внутренние потери

Собственное внутреннее поглощение материала является потерями, вызванными только чистым кремнием, тогда как внешние потери — это потери, вызванные наличием примесей в оптоволокну (они рассматриваются в разделе 6.2.2). В каждом конкретном материале, благодаря его молекулярной структуре, существует поглощение сигнала определенных

длин волн. В случае двуокиси кремния (SiO_2) существуют электронные резонансы в ультрафиолетовой области для длин волн $\lambda < 0,4$ мкм. Существуют также колебательные резонансы в инфракрасной области, где $\lambda > 7$ мкм. Расплавленная двуокись кремния (стекло), которая является материалом оптического волновода, по своей природе аморфна. Поэтому эти резонансы существуют в форме полос поглощения, хвосты которых простираются в область видимого спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности этот тип поглощения вносит вклад на уровне не более чем 0,03 дБ/км [6.1]. Производители оптоволокна не могут влиять на эту составляющую поглощения, разве что перейти на другой материал для передачи светового сигнала.

6.2.2. Потери от наличия примеси (внешние потери поглощения)

Внешние потери поглощения привнесены примесями оптоволокна. Современные технологии производства уменьшили вклад от этих потерь до очень низкого уровня. В эту группу потерь вносят вклад следующие примеси: железо, медь, никель, магний и хром, которые создают существенные источники поглощения в интересующих нас окнах прозрачности. В современном процессе производства содержимое этих металлов было снижено до величин меньше одной миллиардной части, и, следовательно, они вносят очень малый вклад в общие внешние потери поглощения. В отличие от них, потери за счет наличия остаточных гидроксильных ионов (ОН) создают линию поглощения 2730 нм, ее гармоники и комбинационные составляющие 1390, 1240 и 950 нм, все они вносят существенный вклад в общие внешние потери поглощения. Эти потери вызваны наличием воды в волокне, оставшейся в процессе производства. Уровень ионов ОН в оптоволокне должен быть снижен до величин меньших одной стомиллионной части, для того чтобы поддерживать потери волокна на надлежащем уровне. Даже такая малая концентрация ОН, как одна миллионная, способна вызвать потери 50 дБ в районе «водяного

пика» — 1390 нм.

6.2.3. Рэлеевское рассеяние

Этот тип потерь является внутренним и вызван флуктуациями мгновенной плотности и вариациями концентрации молекул за счет несовершенства внутренней структуры волокна: воздушных пузырьков, неоднородностей и трещин, или несовершенством направляющего волновода, вызванным общей нерегулярностью системы сердцевина-оболочка. Существует точка на кривой поглощения в районе 1550 нм, где поглощение инфракрасных и ультрафиолетовых хвостов минимальны. Вокруг этой точки рэлеевское рассеяние является главной составляющей общих потерь. Рэлеевское рассеяние обратно пропорционально длине волны. С ростом длины волны рассеяние убывает. На длинах волн выше 1600 нм инфракрасное поглощение становится доминирующим.

6.2.4. Несовершенство оптического волокна (ОВ)

Несовершенство волокна - еще один источник потерь. Это потери включают потери от микроизгибов и макроизгибов, которые рассматривались в разд. 2.3. Геометрия волокна - еще одно важное понятие, описывающее несовершенство и требующее рассмотрения.

6.2.4.1. Геометрия стекла

Геометрия стекла описывает концевые размерные характеристики оптического волокна. Геометрия (и это уже давно поняли) является главным фактором, определяющим потери в сростке и процент удачно выполненных сростков. Главная цель производителя оптоволокна получить более точную геометрию волокна. Волокно, полученное с соблюдением более жестких допусков на его геометрию, легче и быстрее сростить и при этом быть уверенным в высоком качестве сростка и предсказуемости полученных характеристик.

Три параметра (как показала практика) оказывают наибольшее влияние на характеристики сродка: concentricity сечений сердцевины и оболочки, допуск на диаметр оболочки и собственный изгиб волокна.

Concentricity сердцевины и оболочки дает понять насколько хорошо сердцевина волокна центрируется в стекле оболочки. Улучшение этой характеристики при производстве волокна уменьшает шанс неточного расположения сердцевины, что способствует получению сродков с меньшими потерями.

Внешний диаметр оболочки определяет размер волокна. Чем более жесткой является спецификация диаметра оболочки, тем меньше шансов, что партии волокна будут иметь различные диаметры. Допуск на диаметр оболочки особенно важен, когда используются калиброванные наконечники или осуществляется сочленение разъемных соединителей в полевых условиях. Все эти соединители рассчитаны по диаметру оболочки в месте выравнивания волокон для соединения.

Собственный изгиб волокна указывает на величину кривизны волокна вдоль некоторой длины волокна. Большая величина собственного изгиба может привести к слишком большому смещению волокна при сварке или выравнивании конца волокна в V-образной канавке, что может привести к сродкам с большими потерями.

6.3. Дисперсия

Влияние дисперсии сказывается в уширении светового импульса при его передачи по оптоволокну. Различают четыре типа дисперсии, каждый из которых вызван теми или иными причинами:

1. Межмодовая дисперсия.
2. Материальная дисперсия.
3. Хроматическая дисперсия (во многих текстах материальная и

хроматическая дисперсии не разделяются).

4. Поляризационная модовая дисперсия (PMD).

6.3.1. Межмодовая дисперсия

В разделе 2.2 мы видели, что свет, распространяющийся по многомодовому волокну представлен многими траекториями лучей, путь каждой из которых в сердцевине волокна отличается друг от друга. Возвращаясь к гл. 1, из уравнения (1.6) получим, что число мод, распространяющихся по волокну, равно:

$$M = V^2 / 2 \quad (6.1)$$

где V — нормализованная частота, определяемая выражением (1.5). Если $V = 2,405$ или меньше, то распространяется только одна мода, если же V больше, то распространяются много мод. На рис. 2.4 приведен пример многомодовой передачи света по волоконному световоду. Он показывает эффект уширения светового импульса при его распространении на какое-то расстояние, а также то негативное влияние, которое это оказывает на форму последовательности NRZ импульсов. Этот тип искажений можно устранить путем использования одномодового волокна, где $V < 2,405$.

Мы используем термин *искажения*, вместо термина дисперсия, основываясь на определении IEEE [6.2]: «В дополнении к этому, сигнал ухудшается под действием многомодовых *искажений*, которые часто (ошибочно) классифицируют как многомодовую *дисперсию*».

К приемному концу волокна энергия различных мод прибывает с какой-то задержкой во времени по отношению к основной моде (HE_{11}). Это вызывает размазывание принятого импульса, что безусловно оказывает деструктивное действие, так как часть размазанной энергии попадает в битовый интервал соседнего бита. Если в этот битовый интервал попадет достаточное количество размазанной энергии, то с вероятностью 50% соседний бит будет принят с ошибкой.

6.3.2. Материальная дисперсия

Материальная дисперсия (D_M) вызвана тем, что различные длины волн проходят через определенные материалы с различными скоростями. Известно соотношение, определяющее показатель преломления (n):

$$n = c/v, \quad (6.2)$$

где c — скорость света в вакууме, а v - скорость исследуемой волны в данном материале. Конечно, интересующим нас материалом является кварцевое стекло (SiO_2). Проблема в том, что каждая волна распространяется в данном материале со скоростями, несколько отличающимися друг от друга.

Институт IEEE [6.2] определяет *материальную дисперсию* «как дисперсию, соотносимую с зависимостью длины волны от показателя преломления того материала, из которого сформирован волновод».

По мере того, как мы будем углубляться в обсуждение дисперсии, проницательный читатель поймет то, что *хроматическая дисперсия* должна рассматриваться в рамках понятия материальная дисперсия. И он будет прав. Однако, по причинам, которые будут понятны далее, хроматическая дисперсия рассматривается отдельно.

В гл.4 говорилось о том, что СИД излучает широкий спектр длин волн в диапазоне от 30 до 100 нм, тогда как DFB лазер излучает спектральную линию шириной от 0,1 до 1,0 нм. Очевидно, если в каком-то определенном звене мы озабочены дисперсией, то можно было бы использовать DFB лазер вместо СИД и ориентироваться на одномодовое волокно.

Существует одно интересное явление относительно скоростей распространения внутри материала. В полосе прозрачности 850 нм более длинные волны распространяются с большей скоростью, чем короткие (например, излучение на длине волны 865 нм распространяется в кварцевом стекле с большей скоростью, чем излучение на длине волны 835 нм).

Совсем наоборот происходит в полосе прозрачности 1550 нм, более короткие длины волн распространяются с большими скоростями, чем более длинные (например, длина волны 1535 нм распространяется быстрее, чем

длина волны 1560 нм).

Еще одно интересное явление имеет место в полосе прозрачности 1310 нм. Существует длина волны λ_{ZD} , выше которой дисперсионный параметр D_M положителен, а ниже которой D_M отрицателен. Эта длина волны называется *длиной волны нулевой дисперсии*, она равна для чистого диоксида кремния 1276 нм. Ее значение может меняться в пределах 1270-1290 нм для оптического волокна, сердцевина и оболочка которого легируются для получения необходимого показателя преломления. Длина волны нулевой дисперсии для оптических волокон зависит также от диаметра сердечника и вклада шага Δ показателя преломления в сечении волновода в полную дисперсию [6.1].

Следует указать, что *волноводная дисперсия* сдвигает длину волны нулевой дисперсии на 30-40 нм, так что полная дисперсия оказывается равной нулю около 1310 нм для промышленных волокон.

Материальная дисперсия - главная составляющая дисперсии в системах с одномодовым волокном. Для систем с многомодовым волокном вклад материальной дисперсии в полную дисперсию фактически незначителен. Основной здесь является модовая дисперсия.

В мою бытность консультантом, я советовал своим клиентам, что если они используют одномодовое волокно и DFB лазер в качестве источника света, то предельной (с точки зрения ограничения по мощности) является скорость линии 1,2 Гбит/с. Но на смену пришли линии со скоростью 2,5 Гбит/с. И если клиент изменял скорости с меньшей на большую, то я советовал: «Наблюдайте, как они будут себя вести».

Рассмотрим влияние дисперсии на принимаемый двоичный поток. Если скорость передачи возрастает, ширина битового интервала становится меньше. Если формат кодирования - NRZ, то ширина этого битового интервала становится равной *битовому периоду*. Следовательно,

$$\text{Битовый период (в сек)} = 1/(\text{битовую скорость передачи}) \quad (6.3)$$

Ниже приведены несколько примеров:

- для двоичного потока 1 Мбит/с битовый период равен 1 мкс;
- для двоичного потока 10 Мбит/с битовый период равен 100 нс;
- для двоичного потока 1 Гбит/с битовый период равен 1 нс;
- для двоичного потока 10 Гбит/с битовый период равен 100 пс.

Видно, что битовый интервал становится все меньше и меньше. Чем меньше он становится, тем больше он подвержен действию дисперсии!

В процессе эволюции ВОСП работа на длине волны вблизи нуля дисперсии была очень привлекательной. Однако системы с меньшими скоростями работали в полосе прозрачности 1550 нм, где потери на километр кабеля были минимальны. Было бы замечательно, если бы мы смогли перенести область нулевой дисперсии в полосу прозрачности 1550 нм.

6.3.3. Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия является неким расширением понятия материальная дисперсия. Когда мы имеем дело с дисперсией, влияющей на характеристики при высокой скорости передачи (например, > 1 Гбит/с), битовый период, а следовательно, битовый интервал, настолько мал, что даже при использовании DFB-лазера с его очень узкой спектральной линией, наблюдается эта форма материальной дисперсии.

В руководстве [6.4] к этому вопросу подходят несколько по другому. Все стекло, включая то, что используется для производства оптоволокна, демонстрирует материальную дисперсию, потому что его коэффициент преломления изменяется с длиной волны (как мы и описывали ранее). Дополнительно к этому, когда одномодовое волокно вытягивается из стекла, геометрическая форма и профиль коэффициента преломления вносят существенный вклад в волновую зависимость скорости импульса, распространяющегося по волокну, т.е. в *волноводную дисперсию*. Взятые вместе, материальная дисперсия (D_M) и волноводная дисперсия (D_W) дают то, что носит название *хроматическая дисперсия*.

Искажения, вызванные хроматической дисперсией, такие же, как и ис-

кажения от других видов дисперсии, их суть в уширении принятого импульса. В некоторых работах хроматическая дисперсия называется *дисперсией групповых скоростей* (GVD), вызванной волновой зависимостью групповой скорости в волокне. Хроматическая дисперсия измеряется в пикосекундах/нанометр-километр (пс/(нм·км), тоже что и пс/нм/км). Это уширение в пс, происходящее в импульсе шириной в 1 нм при прохождении по волокну длиной в 1 км. Например, в окне прозрачности 1550 нм можно ожидать такую дисперсию в стандартном одномодовом волокне на уровне 17 пс/нм/км. Можно также говорить о *наклоне кривой дисперсии* (дисперсионного параметра). Он описывает, как дисперсия для определенного волокна изменяется с длиной волны, или более точно, нужно говорить о скорости изменения дисперсии с длиной волны.

Нас, фактически, интересует дисперсионный параметр D , выраженный в пс/нм/км:

$$D = D_M + D_W \quad (6.4)$$

Мы будем использовать критерий $B \times \Delta T < 1$, чтобы определить влияние дисперсии на битовую скорость передачи с помощью выражения (6.5), где ΔT — временной интервал, который должен быть короче, чем битовый интервал (битовый период). Напоминаем, что для формата кодирования NRZ битовый период (в сек) равен $1/(\text{битовую скорость})$.

Используя критерий, приведенный выше, получаем

$$B \times L \times D \times \Delta \lambda < 1 \quad (6.5)$$

(это неравенство справедливо для действительных значений D — дисперсионного параметра, определенного выше). Неравенство (6.5) [6.1] дает возможность определить порядок величины дисперсии, которая может оказать влияние на скорость передачи. Величину ΔT можно оценить как

$$\Delta T = L \times D \times \Delta \lambda \quad (6.6)$$

где L — длина линии, а $\Delta \lambda$ - эквивалент спектральной ширины импульса.

Произведение $B \times L$ (скорости передачи B на длину линии L) можно оценить из (6.6). Для одномодового волокна и при использовании SLM DFB

лазерного источника, для которого $\Delta\lambda < 1$, получаем, что оно может превысить 1 Тбит/с на километр. Для его улучшения нужно использовать лазеры с шириной спектральной линии как можно уже. Доминирующей и в этом случае является хроматическая дисперсия.

Определенные усилия по сдвигу длины волны нулевой дисперсии в область окна прозрачности минимальных потерь 1550 нм привели к успеху. Такое волокно называется *волокном со сдвигом дисперсии*. Оно описано в рекомендации ITU-T G.653 [6.3]. Необходимый сдвиг дисперсии был получен путем манипуляции параметрами волноводной дисперсии, учитывая, что D_W зависит от таких параметров волокна, как радиус сердцевинки a и разница показателей преломления. Можно также так отрегулировать вклад волноводной дисперсии, что общая дисперсия D будет относительно мала в довольно широком диапазоне длин волн от 1300 до 1600 нм. Этот тип волокна называется *волокном с уплощенной дисперсией* (или *с ненулевой смещенной дисперсией*), он описан в рекомендации ITU-T G.655, где хроматическая дисперсия специфицирована на уровне 6 пс/нм/км, или меньше, в диапазоне от 1530 до 1565 нм - наиболее популярном для современных систем WDM.

Хроматическая дисперсия линии передачи накапливается с ростом пройденного расстояния, это характеризуется изменением групповой задержки, отнесенным к единичной длине волны (пс/нм). Хроматическая дисперсия линии передачи чувствительна к:

- увеличению числа звеньев тандемного соединения и длиной линии передачи;
- увеличению скорости передачи (заметим, что увеличение скорости передачи увеличивает скорость модуляции лазера, увеличивая, тем самым, ширину боковых полос).

В системах WDM на хроматическую дисперсию оказывает влияние (хотя и не столь существенное):

- уменьшение шага между каналами;

- увеличение числа каналов.

Влияние хроматической дисперсии уменьшается:

- с уменьшением абсолютной величины хроматической дисперсии волокна (уменьшение величины D);

- при использовании компенсации дисперсии.

Управление хроматической дисперсией особенно критично в системах WDM.

6.3.4. Поляризационная медовая дисперсия (PMD)

В одномодовом волокне единственной присутствующей модой является H_{11} . Однако, если учитывать поляризацию, то в одномодовом волокне присутствуют две моды. Эти две моды предполагаются нами взаимно ортогональными, а поляризация - линейной. Одна из этих мод является доминантной и распространяется в горизонтальной плоскости вдоль оси x , другая распространяется в вертикальной плоскости вдоль оси y . В некоторых публикациях говорят о быстрой оси и медленной оси распространения. Эта идеальная ситуация могла бы соответствовать идеальному волокну с точной геометрией. В руководстве [6.4] указано, что эти оси не обязательно соответствуют линейному состоянию поляризации.

В реальной ситуации, когда волокно помещено в кабель и проложено в поле, трудно рассчитывать, что оно идеально. Существуют ряд напряженных состояний, возникающих в волокне в процессе производства. Сердечник волокна и оболочка формируются в процессе механического вытягивания, вызывающего непредсказуемое *двойное лучепреломление* в волокне (приводящее к обмену мощностями между двумя состояниями поляризации [6.1], в результате чего эффективная скорость распространения света в среде зависит от ориентации электрического поля света [6.4]). Механическое действие процесса намотки волокна на оправку вызывает асимметричное напряжение. Когда кабель окончательно прокладывается, возникают другие напряжения. Эти действия вызывают деформацию волокна, нарушающую

округлость волокна или концентричность сердцевины относительно оболочки. Они могут приводить к удлинению волокна и его изгибу.

После того как волокно помещено в кабель и на него действуют все вышеописанные напряжения, ориентация рассмотренных осей и относительная разница в скорости распространения света по каждой из осей (непосредственно связанная с величиной локального двойного лучепреломления) изменяются вдоль оптического пути распространения. Можно предположить, что для некоей идеальной ситуации различные сегменты волокна имели бы различные ориентации этих локальных осей двойного лучепреломления. В каждом сегменте волокна между двумя порциями света, ориентированными по этим локальным (быстрым и медленным) осям, вводятся временные задержки. Так как относительная ориентация этих осей в соседних сегментах различна, импульс будет испытывать статистическое уширение во времени. В результате мы получаем *поляризационную модовую дисперсию PMD* [6.4].

PMD измеряется в пикосекундах для конкретного перекрытия установленного волокна. Дефекты в волокне либо добавляют, либо взаимодействуют с PMD, в результате происходит плавное увеличение уровня PMD в процессе прохождения светового импульса вдоль волокна от секции к секции. Соответствующие единицы для такого коэффициента, который характеризует волокно как таковое, имеют размерность пс/км^{1/2}. Для волокна, составленного из нескольких секций, нужно использовать среднее квадратическое суммирование PMD, соответствующих каждому участку.

Влияние хроматической дисперсии можно уменьшить путем использования *компенсаторов дисперсии*. Однако до настоящего времени не существовало путей уменьшения PMD.

Влияние PMD на ВОСП возрастает:

- с увеличением скорости передачи в канале (когда битовый период уменьшается);
- с увеличением длины звена (между регенераторными секциями);

- с увеличением числа каналов (плотные WDM).

PMD может быть уменьшена благодаря более жесткому контролю на этапе производства волокна [6.4].

6.3.5. Компенсация дисперсии

Существуют два различных устройства, которые могут быть использованы для компенсации хроматической дисперсии. Первое устройство - это *волокно, компенсирующее дисперсию (DCF)*, второе устройство использует сформированную в волокне *дифракционную чирп-решетку Брэгга*.

6.3.5.1. Волокно, компенсирующее дисперсию (DCF)

Хроматическая дисперсия накапливается в значительной степени линейно с ростом длины пути, пройденного в волокне. Это облегчает ее компенсацию. Если мы добавим к нашей работающей линии передачи волокно с большой дисперсией, коэффициент которой (параметр D) имеет противоположный знак, а величина примерно равна той, что накопилась в работающей линии, то мы сможем практически скомпенсировать эту дисперсию. DCF может иметь дисперсионный коэффициент (параметр D) на уровне -200 пс/нм/км [6.1] (максимально модули DCF могут иметь D до -2040 пс/нм/км, что дает возможность компенсировать накопленную дисперсию линии длиной до 120 км).

Длина DCF должна быть как можно короче. Эта длина (L_2) может быть вычислена по следующей формуле:

$$L_2 = -(D_1 / D_2) L_1 \quad (6.7)$$

где L_1 — длина линии с работающим волокном, L_2 — длина волокна DCF, D_1 - дисперсионный параметр работающего волокна и D_2 — дисперсионный параметр DCF.

Ряд проблем возникает и при использовании DCF. Во-первых, специальное волокно, используемое в DCF, вносит значительно большие потери,

чем работающее волокно. Эти потери составляют от 0,4 до 1,0 дБ/км и добавляются к общим потерям линии передачи. Во-вторых, требуется около 1 км DCF, чтобы компенсировать 10-12 км рабочего волокна. В-третьих, как описывает Агравал [6.1], ввиду меньшего диаметра медового поля, оптическая интенсивность внутри DCF выше при заданной входной мощности, что приводит к возрастанию уровня нелинейных эффектов.

Для того, чтобы техника рассмотренной компенсации была эффективна, необходимо измерять общую дисперсию установленного звена передачи и дисперсионный параметр DCF.

6.3.5.2. Компенсаторы на дифракционных решетках Брэгга

Другой путь скомпенсировать хроматическую дисперсию состоит в использовании техники, основанной на дифракционной решетке Брэгга. Здесь используются преимущества, вызванные ЛЧМ-образным изменением показателя преломления, создающим условия селективного отражения определенных длин волн. Оптоволоконная дифракционная решетка Брэгга работает как оптический фильтр, благодаря существованию «полосы задерживания». Эта полоса центрируется в районе *брэгговской длины волны*. Брэгговская длина волны является функцией периода дифракционной решетки и индекса моды [6.1].

Дифракционные решетки Брэгга имеют относительно узкую полосу задерживания. В настоящее время требования ВОСП таковы, что нужны более широкие полосы задерживания. Надлежащее решение обеспечивается *дифракционными чирп-решетками Брэгга*. В этих решетках оптический период изменяется линейно по длине решетки. Так как брэгговская длина волны также меняется по длине решетки, различные частотные компоненты падающего импульса отражаются от различных точек (вдоль решетки), в зависимости от того, где локально удовлетворяются условия Брэгга.

Ключевым моментом для понимания компенсации дисперсии с помощью чирп-решетки Брэгга является скорость распространения света. При

использовании стандартного волокна, работающего в полосе прозрачности 1550 нм, высокочастотные составляющие оптического импульса распространяются быстрее, чем низкочастотные. Если рассмотреть факт увеличения брэгговской длины волны при движении вдоль решетки, нужно отметить, что низкочастотные составляющие вынуждены двигаться дальше вдоль решетки, прежде чем они испытают отражение. То есть они испытывают большую задержку, вносимую такой решеткой, чем высокочастотные составляющие. Эта приводит к относительной задержке, вносимой решеткой, которая прямо противоположна задержке волокна, которое компенсирует дисперсию данного волокна [6.1, 6.4].

6.4. Нелинейные эффекты

В этом разделе мы кратко рассмотрим 7 различных явлений:

- 1 - вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS);
- 2 - вынужденное Рамановское рассеяние (SRS);
- 3 - фазовую самомодуляцию (SPM);
- 4 - четырехволновое смешение (ЧВС);
- 5 - модуляционную нестабильность (MI);
- 6 - формирование солитона;
- 7 - фазовую кросс-модуляцию.

С ростом емкости ВОСП очевидна тенденция увеличения мощности сигнала. Однако мощность сигнала не может расти бесконечно, учитывая, что как только уровень мощности повышается, оптические нелинейности будут действовать так, чтобы изменить характеристики системы. В этой ситуации приходится устанавливать верхний предел оптической мощности, который, в свою очередь, установит предел отношения С/Ш, а, следовательно, максимально допустимую емкость ВОСП. Другие факторы, устанавливающие предел роста емкости системы передачи, будут

рассмотрены в последующих разделах.

Можем ли мы использовать указанные нелинейности в свою пользу? Ответы на такие вопросы приводят нас к возможности компенсации нелинейной дисперсии и солитонным системам передачи.

6.4.1. Введение в оптические нелинейности

Нелинейные взаимодействия между оптическим сигналом и оптоволоконной средой передачи стали рассматриваться, как только была увеличена мощность оптического сигнала. Последняя была увеличена для того, чтобы компенсировать большие вносимые потери при использовании оборудования WDM и для достижения больших длин секций. Следствием этого стала необходимость рассматривать влияние нелинейных эффектов на участках, где регенерация отсутствует, и там, где используются системы WDM и DWDM.

Эти нелинейности могут быть разбиты на две основные группы: нелинейности, связанные с эффектами рассеяния (это рассеяния Бриллюэна и Рамана) и эффектами типа эффекта Керра. *Эффект Керра* состоит в изменении коэффициента преломления материала под действием электрического поля. Это приводит к зависимости показателя преломления от интенсивности излучения. К этой группе нелинейностей мы относим фазовую самомодуляцию, фазовую кросс-модуляцию, модуляционную нестабильность, солитоны и четырехволновое смешение. Эти эффекты определяются следующими параметрами волокна и сигнала, распространяющегося по нему: дисперсионными характеристиками волокна, эффективной площадью сердцевины волокна, числом и шагом между оптическими каналами в многоканальных системах, полной не регенерируемой длиной системы, а также интенсивностью сигнала и толщиной излучаемой спектральной линии.

6.4.2. Вынужденное рассеяние Бриллюэна

Вынужденное рассеяние возникает тогда, когда падающий сигнал

рассеивается. Это рассеяние может быть как в прямом, так и в обратном направлениях, и объясняется действием одного или нескольких механизмов. В каждом случае, свет сдвигается в область длинных волн. Например, при длине волны 1550 нм рассеянный свет сдвигается вправо (рассеяние Бриллюэна, в отечественной литературе его называют рассеянием Мандельштама-Бриллюэна) примерно на 11 ГГц.

Среди всех нелинейностей, рассмотренных в этом разделе, вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS) имеет наименьшую пороговую мощность. Было показано, что порог SBS может изменяться в зависимости от типа волокна и даже среди отдельных волокон. Как правило, он имеет порядок 5-10 мВт для узкополосных источников света с внешней модуляцией. Для лазеров с непосредственной модуляцией эта мощность может быть порядка 20-30 мВт.

Для волокон типа G.653 порог SBS несколько меньше, чем для систем с волокном типа G.652. Это происходит благодаря меньшей эффективной площади волокон типа G.653. Можно также сказать, что это справедливо для всех нелинейных эффектов, которые мы будем рассматривать. Порог SBS чувствителен к спектральной ширине источника излучения и уровню излучаемой мощности. Однако он не зависит от числа каналов WDM.

6.4.2.1. Эффекты ухудшения передачи

SBS ограничивает количество световой энергии, которое может быть передано по волокну. На рис. 6.1 показано действие этого эффекта для узкополосного источника, когда вся мощность сигнала попадает в ширину полосу Бриллюэна. Переданная мощность достигает насыщения и резко нарастает мощность обратного рассеяния. Уровень входной мощности, подаваемой на волокно, при котором это резкое нарастание происходит, определяется как порог SBS и выражается формулой:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_p - \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}$$

где g — означает коэффициент усиления Бриллюэна, A_{eff} — эффективная площадь сердечника, K — постоянная, определяемая степенью свободы состояния поляризации (в рекомендации G.652, $K = 2$). Переменные $\Delta\nu_B$ и $\Delta\nu_p$ представляют спектральную ширину полосы Бриллюэна и источника накачки соответственно. L_{eff} — обозначает эффективную длину, определяемую как

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$$

где α — коэффициент затухания волокна, а L — длина волокна.

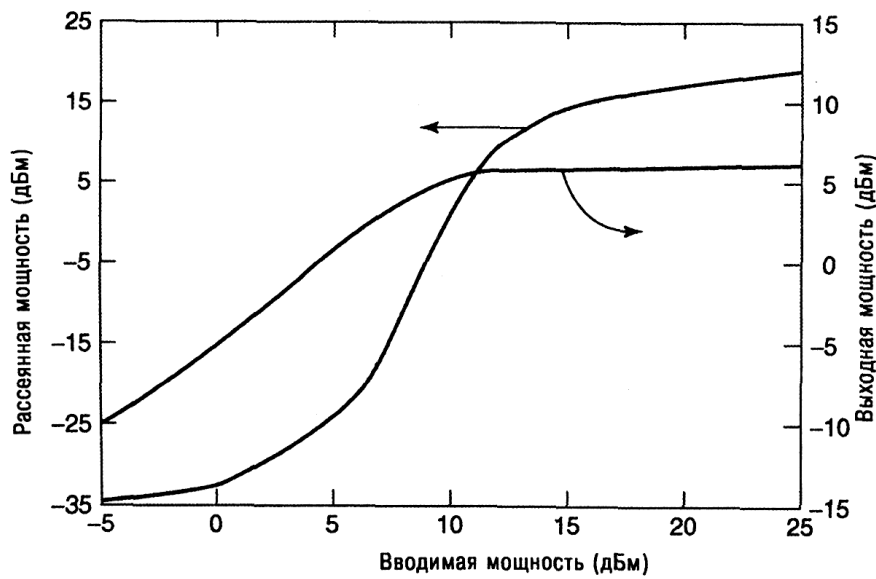


Рис. 6.1. Порог вынужденного рассеяния Бриллюэна для узкополосного источника света (см. рис. II.3-1/G.663, p. 11, ITU-T G.663, [6.10])

Порог SBS P_{th} зависит от ширины линии световой накачки $\Delta\nu_p$. Если ширина линии световой накачки меньше, чем ширина полосы Бриллюэна, то пороговая мощность SBS можно оценить, используя следующее соотношение:

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}}$$

6.4.2.2. Возможности снижения этих эффектов

Ухудшения, вызванные SBS, не возникнут в системах, где ширина

линии источника значительно превосходит ширину полосы Бриллюэна, или там, где мощность сигнала меньше пороговой мощности SBS.

6.4.3. Вынужденное рассеяние Рамана

Вынужденное рассеяние Рамана (SRS) вызывает ухудшение сигнала только тогда, когда уровень оптической мощности оказывается высок. Его влияние чем-то похоже на рассеяние Бриллюэна, но излучение света сдвигается в область существенно более низких частот (между 10 и 15 ТГц) для 1550 нм окна. Кроме этого сдвинутая низкочастотная составляющая имеет значительно более широкую полосу, чем полоса Бриллюэна (около 7 ТГц). В системах WDM влияние этого типа рассеяния заключается в перераспределении мощности из коротковолновых в длинноволновые каналы. В этом случае это явление работает как рамановский усилитель и длинноволновые каналы усиливаются за счет коротковолновых каналов до тех пор, пока разница в длинах волн лежит в полосе частот рамановского усиления. Это явление может возникнуть в кварцевом волокне, где усиление может стать результатом использования шага между каналами 200 нм.

В работе [6.1] сообщается, что в конфигурации WDM больше всего обедняется самый коротковолновой канал, так как его мощность может перекачиваться во многие каналы одновременно. Такое перераспределение мощности между каналами можно определить по характеристикам системы, так как оно зависит от характера расположения бит. Усиление происходит тогда, когда двоичные 1 присутствуют в обоих каналах одновременно. Такое усиление, зависящее от характера сигнала, ведет к увеличению флуктуации мощности, которая увеличивает уровень шума приемника и ухудшает его характеристики. *Рамановских перекрестных помех* можно избежать, если мощности каналов сделать такими малыми, что рамановское усиление окажется незначительным на всей длине волокна. Особое внимание должно быть уделено SRS тогда, когда несколько усилителей включено последовательно друг с другом. Эти усилители добавляют шум, который

теряет от рамановского рассеяния меньше, чем желаемый сигнал. В результате происходит ухудшение отношения сигнал/шум на удаленном конце у приемника [6.4].

6.4.3.1. Эффекты ухудшения передачи

SRS может возникнуть в системах, использующих как одномодовое, так и многомодовое волокно. Для того, чтобы наблюдать SRS при наличии только одного канала, без использования оптического усилителя, необходимо иметь уровень сигнала порядка +30 дБм или выше. Однако, коротковолновые сигналы систем WDM с большим шагом между каналами могут испытывать ухудшение отношения сигнал/шум, когда часть их мощности будет перекачиваться в длинноволновые каналы, благодаря явлению SRS. Это приводит к ограничению общей емкости системы, учитывая ограничения на общее число каналов WDM, их шага по сетке частот (длин волн), общей длины системы и средней входной мощности. В рекомендации [6.10] для этой ситуации, в частности, указывают, что порог, при котором в многоканальной системе наблюдается ухудшение на 1 дБ, вызванное наличием рамановского усиления в волокне без сдвига дисперсии, может быть оценен из неравенства:

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40 [\text{мВт} \cdot \text{нм} \cdot \text{Мм}] \quad (6.8)$$

где P_{tot} — суммарная мощность всех каналов WDM (мВт), $\Delta\lambda$ — полоса оптического спектра (нм), в которой распределены эти каналы, L_{eff} — эффективная длина, выраженная в мегаметрах — Мм. Порог SRS для систем, использующих волокно типа G.653 несколько ниже, чем для систем, использующих волокно типа G.652, благодаря меньшей эффективной площади волокна G.653. SRS практически не вносит ухудшений в одноканальные системы. Однако оно может ограничить возможности систем WDM.

6.4.3.2. Возможности снижения этих эффектов

При использовании одноканальных систем нежелательные участки

спектра могут быть убраны с помощью фильтров. Однако для WDM систем до сих пор практически нет технических приемов, позволяющих устранить влияние SRS. Вместе с тем влияние SRS можно снизить путем уменьшения входной оптической мощности. В рекомендации [6.10] сообщается, что SRS, видимо, не представляет практических ограничений внедрению систем WDM.

6.4.4. Фазовая самомодуляция

Когда выходной уровень источника света становится слишком большим, сигнал может модулировать свою собственную фазу. Как подразумевает само название, это явление является *фазовой самомодуляцией* (SPM). Как показано на рис. 6.2, это приводит к уширению переданного импульса и временному расширению или сужению сигнала. Что происходит, расширение или сужение, зависит от знака (положительного или отрицательного) хроматической дисперсии. В результате происходит сдвиг фронта импульса в сторону длинных волн и сдвиг среза импульса в сторону коротких волн.

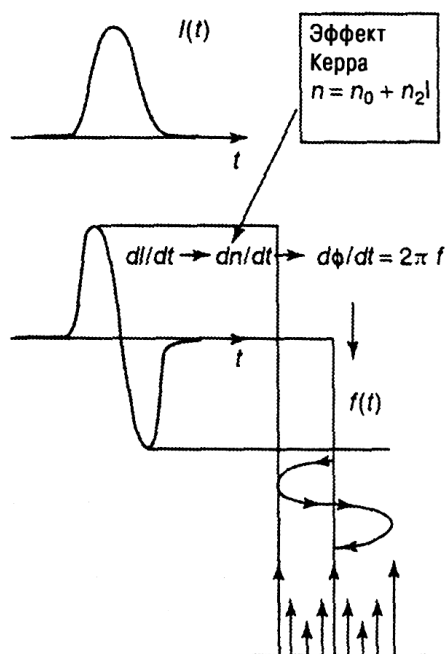


Рис. 6.2. Механизм спектрального уширения за счет фазовой самомодуляции.

(См. рис. II.3-6/G.663, ITU-T G.663, p. 17, [6.10])

6.4.4.1. Эффекты ухудшения передачи

Как можно ожидать, фазовая самомодуляция увеличивается с увеличением передаваемой мощности. Ее действие становится более деструктивным, как только увеличивается скорость передачи в канале и время нарастания импульса становится короче. Она также увеличивается при наличии отрицательной хроматической дисперсии.

На SPM не оказывает существенного влияния уменьшение шага между каналами в системах WDM или увеличение числа каналов. Влияние фазовой самомодуляции уменьшается, если хроматическая дисперсия нулевая или небольшая по величине, или при увеличении площади эффективной области оптоволокна.

В общем случае влияние SPM значительно только в системах с высоким значением накопленной дисперсии или в системах очень большой протяженности. Оптоволоконные системы, имеющие ограниченную накопленную дисперсию, могут не вызывать эффектов, характерных для SPM. В системах WDM с очень малым шагом между каналами, спектральное уширение, вносимое действием SPM, может также вызвать интерференцию между соседними каналами.

При использовании стандартного волокна типа G.652, SPM, в зависимости от передаваемой мощности, может приводить к сжатию импульсов для сигналов с небольшим чирпом, модулированных по интенсивности, как и при использовании волокна типа G.655 с аномальной дисперсией. Сжатие импульса противодействует влиянию хроматической дисперсии и дает некую приспособленность к действию дисперсии. Существует, однако, предел максимальной дисперсии и связанная с ним максимальная длина передачи.

6.4.4.2. Возможности снижения этих эффектов

Выбор рабочей длины волны для волокна типа G.653 вблизи длины волны нулевой дисперсии приводит к снижению влияния SPM. На относи-

тельно коротких ВОЛС длиной не более 1000 км, SPM может управляться с помощью модулей компенсации дисперсии, расположенных на определенных расстояниях вдоль трассы ВОЛС с волокном типа G.652. Как было указано выше, действие многих из указанных здесь эффектов может быть снижено путем уменьшения мощности сигнала или же путем использования длины волны выше длины волны нулевой дисперсии на рабочем волокне типа G.655.

6.4.5. Четырехволновое смешение

Для тех, кто пришел из радиосвязи, или беспроводной радиосвязи, *четырехволновое смешение* (ЧВС) напоминает нам продукты третьего порядка. Оно может полностью вывести из строя систему WDM. Оно появляется тогда, когда интенсивность лазерного сигнала достигает критического уровня. ЧВС заявляет о себе появлением побочных сигналов, некоторые из которых могут соответствовать частотам рабочих каналов. Всякий раз, когда три или более сигналов распространяются по волокну, можно ожидать возникновения четырехволнового смешения. Эти три световых сигнала: ω_i , ω_j , ω_k генерируют четвертый сигнал ω_{ijk} , подчиняющийся соотношению:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (6.9)$$

ЧВС может возникать даже в одноканальных системах между рабочим сигналом и составляющими ASE ОУ, а также между основной и боковыми модами. В случае двух сигналов, модуляция по интенсивности на частоте биений модулирует показатель преломления волокна и возбуждает фазовую модуляцию разностной частоты, которая (в свою очередь) создает две боковые полосы с частотами, порождаемыми этой разностью. В случае трех сигналов формируется больше составляющих из смеси суммарно-разностных частот большей амплитуды (см. рис. 6.3), некоторые из которых в точности соответствуют рабочим частотам соседних каналов, если шаг между каналами в системе одинаков. Две оптических волны, распространяющиеся вдоль

волокна, генерируют ЧВС с высокой степенью эффективности, если согласуются фазовые сдвиги между частотами боковых полос и начальным сигналом. Для относительно низких оптических мощностей это означает, что

$$2\pi \cdot \Delta\nu^2 D \cdot \lambda_c^2 L / c \ll 1 \quad (6.10)$$

где $\Delta\nu$ — шаг между каналами по сетке частот, D — хроматическая дисперсия волокна (дисперсионный параметр), λ_c — центральная длина волны, L — длина волокна, c — скорость света в вакууме. (Можно принять во внимание потери, если слегка модифицировать неравенство (6.10)). Эффективность ЧВС также чувствительна к общей оптической мощности в волокне. Рассмотрим следующее: для двух сигналов с оптическими мощностями P_1 и P_2 максимальный коэффициент параметрического усиления для боковых полос, g_{\max} , может быть оценен так:

$$g_{\max} = 2g(P_1 + P_2) \quad (6.11)$$

где g — нелинейный коэффициент Керра.

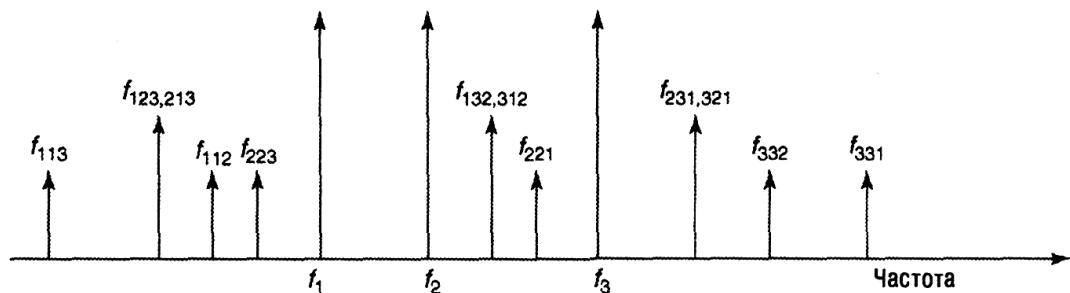


Рис. 6.3. Смесь продуктов, генерируемых благодаря ЧВС, для 3-х оптических сигналов. (См. рис. II, 3-2/G. 663, p. 12, ITU-T. G.663, [6.10]).

6.4.5.1. Эффекты ухудшения передачи

В системах WDM и, в особенности, DWDM, влияние ЧВС особенно разрушительно. В системах DWDM с числом каналов N общее число возникающих в результате действия ЧВС частот составляет

$$N^2(N-1)/2 \quad (6.12)$$

Например, четырехканальная система WDM формирует в результате 24 побочных канала, а восьмиканальная - 224 побочных канала, и т.д.

Особенно серьезные проблемы, благодаря ЧВС, возникают в системах, использующих волокно со сдвигом дисперсии типа G.653 [6.3]. В противоположность этому, расположение оптического рабочего канала непосредственно в точке нулевой дисперсии (или около нее) может привести к очень существенному процессу формирования продуктов ЧВС на очень небольшой длине (десятки километров). При использовании волокна с ненулевой смещенной дисперсией типа G.655 (особенно если оно имеет большую площадь эффективной области) такой острой ситуации не наблюдается. Еще меньше ЧВС влияет на волокно типа G.652 без сдвига дисперсии [6.5], учитывая, что дисперсия здесь достаточно велика.

Уровень ЧВС чувствителен к следующим системным характеристикам:

- увеличению мощности в канале;
- увеличению числа каналов;
- уменьшению шага между каналами.

Так уровень ЧВС резко снижается в системах с шагом 200 ГГц, по сравнению с системами с шагом 100 ГГц.

ЧВС уменьшается с уменьшением абсолютной величины хроматической дисперсии.

Генерация боковых полос ЧВС может привести к значительному обеднению мощности рабочих каналов. Кроме того, когда комбинационные гармоники попадают на частоты рабочих каналов, то возникает параметрическая интерференция, которая может привести как к увеличению, так и уменьшению амплитуды рабочего импульса, в зависимости от фазовых соотношений рабочего сигнала и сигналов боковых полос.

Параметрические потери вызывают закрытие глазковой диаграммы на выходе приемника, приводя к ухудшению уровня ВЕК. Увеличение шага между несущими и хроматическая дисперсия уменьшают эффективность процессов ЧВС за счет разрушения фазовых соотношений между взаимодействующими волнами. Системы, работающие на волокне G.652, меньше страдают от ЧВС, чем системы, работающие на волокне G.653. В

отличие от этого, расположение частоты рабочего канала вблизи нуля дисперсии может привести к существенному формированию продуктов ЧВС на относительно короткой длине волокна (десятки километров). ЧВС также чувствительно к шагу между каналами.

ЧВС может привести к серьезным ухудшениям систем WDM, использующим волокно типа G.653, учитывая, что уровень хроматической дисперсии в канале низок. Влияние дисперсии на достижимую емкость системы с четырьмя рабочими каналами после трех усилительных пролетов показано на рис. 6.4. Из него видно, что может произойти при больших уровнях мощности, когда условия способствуют генерации продуктов смешения. Ограничения емкости подсчитаны в расчете на худший случай генерации продуктов ЧВС для четырех +8 дБм рабочих каналов, центрированных относительно нулевого значения дисперсии. Такая система генерирует недопустимо большие уровни искажений, благодаря ЧВС, как только дисперсия в рабочем канале приближается к нулю.

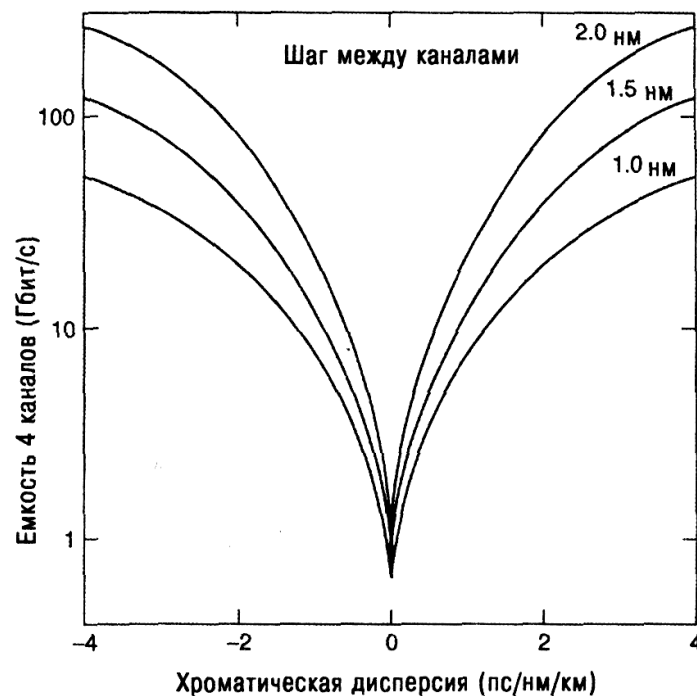


Рис. 6.4. Влияние дисперсии на емкость системы с учетом действия ЧВС.

(См. рис. II.3-3/G.663, p.13, ITU-T G.663, [6.10])

В одноканальной системе, ЧВС может взаимодействовать между составляющими ASE-шума ОУ и рабочими каналами, а также между основной и боковыми модами оптического передатчика. Накопленный ASE-шум, благодаря действию эффекта Керра, добавляет фазовый шум несущей рабочего канала, вызывая, тем самым, расширение хвостов спектра сигнала.

6.4.5.2. Возможности снижения этих эффектов

Как указывалось выше, дисперсия может быть использована для подавления генерации боковых полос ЧВС. Например, это может быть дисперсия, характерная для волокна типа G.655. Для уменьшения влияния эффектов за счет ЧВС, может быть использован также неравномерный шаг между каналами. Снижение уровня входной мощности в системах, работающих на волокне типа G.653, делает возможным использование многоканальных систем, но может оказаться компромиссным решение использовать экономические преимущества оптического усиления.

Для того чтобы адекватно подавлять генерацию продуктов ЧВС, в промышленности было предложено использовать волокно с минимальной допустимой (но не нулевой) дисперсией в области усиления ОУ. Как потенциально пригодный, рассматривается также вариант чередования пролетов, использующих волокно с ненулевой дисперсией и волокно с противоположной по знаку дисперсией, учитывая, что в результате среднее значение хроматической дисперсии близко к нулю. Однако в [6.10] указывается, что эта альтернатива может вызвать трудности в плане прокладки, работы и обслуживания таких кабельных систем, ввиду необходимости использования второго типа кабеля. Были продемонстрированы и аналогичные подходы, использующие длинные пролеты с малой конечной дисперсией, разбитые на короткие участки с волокном противоположного знака (но большой) дисперсии для создания эффекта компенсации. В частности, в звеньях с периодическим усилением короткий отрезок компенсирующего дисперсию волокна может быть помещен в модуль, где расположен оптический

усилитель.

Как средство снижения влияния нелинейных эффектов, позволяющее использовать системы DWDM на волокне G.653, было также предложено использовать неравномерный шаг между каналами и увеличение этого шага. Неравномерный шаг позволяет быть уверенным, что продукты ЧВС, генерируемые тремя и большим числом каналов, не попадут непосредственно на частоты других рабочих каналов. Однако возможность переноса мощности сигналов в продукты смешения (т.е. обеднение мощности сигнала) остается и при неравномерном шаге и все еще может привести к сужению глазковой диаграммы. Увеличенный шаг также уменьшает влияние ЧВС. Использование этих технологий уменьшения влияния ЧВС может быть ограничено сужением общей полосы используемого спектра усиления при последовательном включении ряда оптических усилителей.

6.4.6. Модуляционная неустойчивость

Модуляционная неустойчивость (MI) приводит к превращению непрерывного сигнала или импульса в модулированную структуру. В [6.10] сообщается, что ее можно наблюдать в режиме аномальной дисперсии (т.е. выше длины волны нулевой дисперсии), где квазимонохроматический сигнал имеет тенденцию спонтанно генерировать две симметричные спектральные боковые полосы, как показано на рис. 6.5. Сдвиг частот и усиление боковых полос определяется интенсивностью исходной волны, а также дисперсией и нелинейными коэффициентами волокна. Максимальная эффективность таких преобразований имеет место на частоте сдвига, определяемой из выражения

$$\Omega_{\max} = \pm \left[\frac{8\pi^2 c n_2 P_0}{\lambda^3 A_{\text{eff}} D(\lambda)} \right]^{1/2}$$

где n_2 - нелинейный коэффициент преломления диоксида кремния, A_{eff} - площадь эффективной области волокна, P_0 - вводимая оптическая мощность, $D(\lambda)$ — коэффициент хроматической дисперсии, λ - рабочая длина волны. Боковые полосы располагаются на расстоянии $\pm\Omega_{\max}$ от несущей, которая

испытывает усиление на единицу длины, равное $g_{\max} = 4\pi P_0 / (\lambda A_{\text{eff}})$. Потери волокна можно принять во внимание, если провести небольшую модификацию приведенного выше выражения. Влияние усиления за счет МІ на девиацию частоты по отношению к сигналу (при наличии потерь волокна и для различных значений дисперсии) приведено на рис. 6.6.

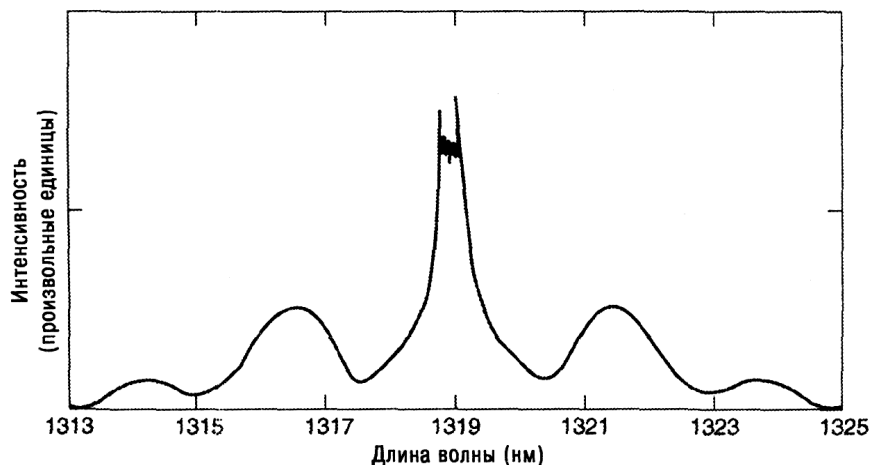


Рис. 6.5. Спектр мощности импульса после распространения по отрезку волокна длиной 1 км. Ширина входного импульса - 100 пс, пиковая мощность 7 Вт. Боковые спектральные полосы появились в результате действия МІ.

(См. рис. II.3-4/G.663, p. 15, ITU-T G.663, [6.10])

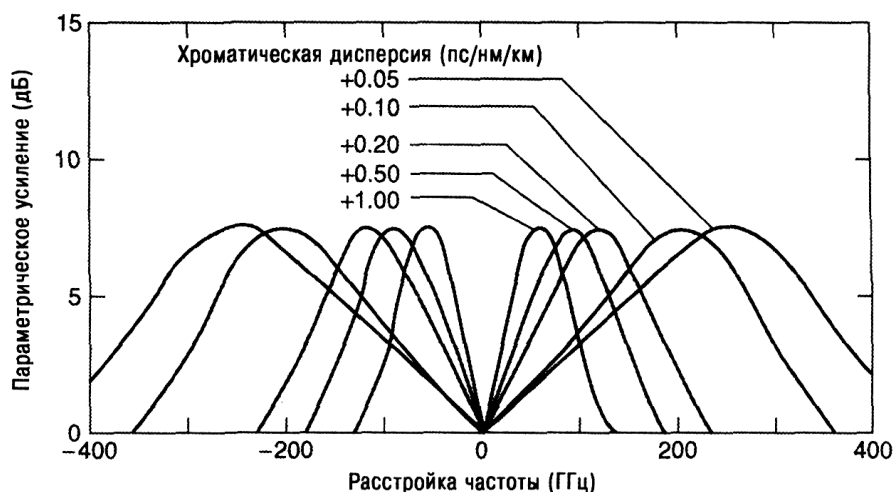


Рис. 6.6. Расчетная зависимость усиления МІ от расстройки частоты, полученная для сигнала на выходе отрезка волокна длиной 30 км (с потерями 0,24 дБ/км) для 5 различных коэффициентов дисперсии и при мощности входного излучения +16 дБм. (См. рис. II.3-5/G.663, p. 15, ITU-T G.663, [6.10])

MI можно рассматривать как частный случай ЧВС, где два фотона входного сигнала преобразуются в два фотона с различными частотами.

6.4.6.1. Эффекты ухудшения передачи

Модуляционная нестабильность (MI) может уменьшить отношение сигнал/ шум, благодаря генерации боковых полос или спонтанно, или вызванной усиленным спонтанным излучением (ASE). Учитывая, что максимальное искажение сигнала ожидается при высоких значениях g_{\max} и для Ω , близких к ширине полосы сигнала, MI может оказаться критичной при использовании очень мощных бустеров в линиях с волокном со сдвигом дисперсии и лазеров с непосредственной модуляцией. В системах с длинными секциями/пролетами без регенерации, MI может наблюдаться при меньших уровнях мощности и может приводить к избыточному усилению шума спонтанного излучения каскадно включенных оптических усилителей. Уширение спектральных хвостов, вызванное индуцированным эффектом Керра, может вызвать обеднение носителей сигналов. Эти хвосты могут быть ослаблены за счет использования узкополосных ASE-фильтров или за счет эффекта самофильтрации в системах большой протяженности.

6.4.6.2. Возможности снижения этих эффектов

Влияние MI можно уменьшить или путем уменьшения уровня мощности или путем выбора диапазона рабочих длин волн ниже точки нулевой дисперсии звена. Управление дисперсией — еще один возможный вариант снижения продуктов боковых полос MI. Другими словами, принятый сигнал должен быть электрически отфильтрован для снижения уровня паразитного усиленного шума. Воздействие, вызванное MI, можно существенно уменьшить путем использования лазеров с внешней модуляцией, дающих более узкий спектр.

6.4.7. Формирование солитонов

6.4.7.1. Использование преимуществ солитона

Если бы можно было оградить себя от влияния дисперсии в ВОЛС и работать в окне прозрачности минимального затухания 1550 нм со скоростью 10 Гбит/с, то можно было бы увеличить расстояние между регенераторами до 1000 км. Это было бы хорошо, в частности, для подводных ВОСП!

Влияние дисперсии на переданный импульс состоит в его уширении по мере того, как он распространяется по волокну. *Солитон* - это импульс, который не изменяет своей формы по мере того, как он распространяется по волокну. Он не уширяется под влиянием дисперсии и нелинейностей волокна.

Солитон демонстрирует баланс между нелинейностью и дисперсией. Нелинейности волокна противодействуют накапливанию дисперсии при распространении импульса по волокну.

Более специфическое определение приведено в [6.1]: оптический солитон является результатом баланса между *дисперсией групповых скоростей* - ДГС (GVD) и *фазовой самомодуляцией* — ФСМ (SPM), описанной в разд. 6.4.2, (под групповой скоростью понимают скорость огибающей группы волн, имеющих близкие частоты; она может быть больше или меньше фазовой скорости волн, в оптике это величина, обратная параметру b_1 , см. также [6.2].). Рассматриваемые по отдельности, каждое из этих явлений ограничивает характеристики ВОСП. ДГС уширяет оптический импульс при его распространении по волокну, когда импульс первоначально частотно-модулирован (чирп-импульс) нужным образом. Такой импульс может быть сжат во время ранней стадии распространения, наделяющей разные знаки параметру ДГС (β_2) и чирп-параметру C , так что их произведение $\beta_2 C$ - отрицательно. ФСМ, являющаяся результатом зависимости интенсивности от показателя преломления, накладывает чирп на оптический импульс, так что $C > 0$. Учитывая, что $\beta_2 < 0$ в области 1550 нм, убеждаемся, что условия $\beta_2 C < 0$ выполняются. Более того, учитывая, что

чирп, возбуждаемый за счет ФСМ, зависит от мощности, не трудно представить, что при определенных обстоятельствах ФСМ и ДГС могут взаимодействовать так, что чирп, возбуждаемый за счет ФСМ, оказывается способным ликвидировать уширение импульса, вызываемое за счет ДГС. Оптический импульс распространяется после этого неискаженным в форме солитона.

Солитоны должны поддерживать определенную обособленность один от другого при передаче последовательности бит информационного потока. Это предохраняет солитоны от взаимодействия, которое может оказаться деструктивным. Для того чтобы достичь необходимой обособленности двух соседних солитонных импульсов, разработчик системы вынужден использовать в качестве формата линейного кодирования RZ (возвращение к нулю), а не NRZ, который является общепринятым. При использовании формата RZ солитон занимает только малую часть битового интервала (битового периода), обеспечивая тем самым достаточную обособленность соседних бит.

Что же ограничивает длину или поддерживаемую скорость передачи солитонной линии связи?

- *Уширение солитонного импульса за счет потерь.* Солитонный импульс должен поддерживать достаточно большую амплитуду. Если этого не происходит, солитонный импульс уширяется. Уменьшенная пиковая мощность ослабляет нелинейные эффекты, необходимые для противодействия влиянию ДГС. Использование волоконно-оптических усилителей (например, типа EDFA) может вернуть солитону необходимый уровень пиковой мощности.

- *Шум усилителя.* Усилители, необходимые для восстановления энергии солитона, добавляют шум, источником которого является *усиленное спонтанное излучение (ASE)*, см. гл. 7.

- *Дрожание фазы (джиттер) за счет линейных оптических усилителей.* Джиттер является тем механизмом, который вносит отклонение позиции солитона от исходно предписанной позиции - в центре битового

интервала. В идеальном случае все солитоны прибывают к приемнику на удаленном конце в центре предписанного им битового интервала. Отклонения от этого идеального положения могут вызвать взаимодействие солитонов и ухудшение показателя BER.

6.4.7.2. Эффекты ухудшения передачи

Эффекты, вызванные формированием солитонов, могут наблюдаться в ВОСП, использующих волокна типа G.652, G.653 и G.655. Как было сказано, формирование фундаментального солитона может быть полезным, однако, солитоны другого порядка приводят к существенному ухудшению передаваемого сигнала. Следовательно, формирование солитонов более высокого порядка устанавливает предел максимальной мощности, которая может быть введена в волокно.

6.4.7.3. Возможности снижения этих эффектов

Образование солитона можно избежать, если ВОСП работает на длине волны ниже длины волны нулевой дисперсии данной линии передачи. Однако в этом режиме работы не только не поддерживается солитонная передача, но и происходит уширение импульса как за счет влияния дисперсии, так и за счет нелинейностей. В этом случае ухудшение сигнала можно уменьшить только за счет надлежащего управления дисперсией по длине линии передачи.

6.4.8. Фазовая кросс-модуляция

В системах WDM, и в особенности в системах DWDM, *фазовая кросс-модуляция* — ФКМ (XPM) будет постепенно расширять спектр сигнала, когда изменения оптической интенсивности приведут к изменениям, вызванным взаимодействием между соседними каналами. Количественная величина такого расширения, вносимого ФКМ, зависит от шага между каналами, потому что внесенные дисперсией дифференциальные групповые скорости

будут вызывать дальнейшее отделение взаимодействующих импульсов при их движении по волокну. Как только спектральное расширение вносится ФКМ, сигнал испытывает большее временное уширение при его движении вдоль волокна, благодаря влиянию хроматической дисперсии.

6.4.8.1. Эффекты ухудшения передачи

Ухудшения, вызванные ФКМ, наиболее существенно проявляются в системах, использующих волокно типа G.652 и G.655. Уширение за счет ФКМ может привести к интерференции (взаимовлиянию) соседних каналов в системах WDM.

6.4.8.2. Возможности снижения этих эффектов

Уровнем ФКМ можно управлять путем надлежащего выбора разноса каналов в системах WDM/DWDM. Исследования показали [6.10], что в системах WDM только соседние каналы вносят значительный вклад в искажения сигнала, вызванного возникновением ФКМ. Отношение сигнал/шум центрального канала в системе, имеющей три канала, достигнет того же уровня, что и в системе с одним каналом, только при увеличении шага между каналами. В результате этого, влияние ФКМ может быть сделано ничтожно малым, если адекватно выбрать шаг между каналами. При моделировании системы с уровнем мощности в канале 5 мВт было показано, что шаг порядка 100 ГГц вполне достаточен, чтобы значительно уменьшить влияние ФКМ. Дополнительные ухудшения за счет дисперсии, вызванные наличием ФКМ, также могут быть управляемы при установке в системе через определенные интервалы модулей компенсации дисперсии.

Обзор нелинейных оптических эффектов в волокне на основе кварцевого стекла приведен в табл. 6.1.

Обзор нелинейных оптических эффектов в стеклянном волокне.

| Нелинейный оптический эффект | Причина | Характеристики | Критическая мощность в ОМОВ | Оказываемое влияние |
|---|--|--|--|--|
| Фазовая самомодуляция (ФСМ), фазовая кросс-модуляция (ФКМ) | Оптический эффект Керра: коэффициент преломления, зависящий от интенсивности | Фазовый сдвиг Самовозбуждаемый (ФСМ) В соседних каналах (ФКМ) Расширение спектра частот | $P_c > \sim 10$ мВт | Спектральное расширение увеличивает влияние дисперсии Скорость передачи ограничена мощностью и дисперсией Сжатие импульса (положительная дисперсия) Распространение импульса (солитон) Ограничения в системах фазовой манипуляцией за счет АМ/ФМ конвертирования |
| Вынужденное Рамановское рассеяние (SRS) | Взаимодействие фотонов с оптическими фононами | Линии Рамана $f - n\Delta f$ (Стоксовы) $\Delta f = 12$ ТГц $\Delta\lambda = 70$ нм (1310 нм) $\Delta\lambda = 102$ нм (1550 нм) | $P_c > \sim 1$ Вт (1 канал) $P_c > \sim 1$ мВт для рамановского усиления в системах WDM с критическим шагом между каналами $\Delta\lambda$ | Оптические потери в волокне Оптическая переходная помеха в системах WDM Обеднение мощности сигнала |
| Вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS) | Взаимодействие фотонов с акустическими фононами | Линии Бриллюэна в обратном направлении $f \pm n\Delta f$ $\Delta f = 13,2$ ГГц (1310 нм) $\Delta f = 11,1$ ГГц (1550 нм) | $P_c > \sim 5$ мВт (для узкополосного оптического источника) P_c растет с ростом ширины линии сигнала | Неустойчивость сигнала Оптические потери в ОВ Оптическая переходная помеха в двунаправленных когерентных многоканальных системах |
| Четырехфотонное смешение или четырехволновое смешение (FWM) | Многофотонное взаимодействие | Генерирование смещенных продуктов: $f_4 = f_1 \pm f_2 \pm f_3$ | $P_c > \sim 10$ мВт, для волокна G.652 (зависит от разности каналов и близости к λ_0) | Оптическая переходная помеха в системах WDM Обеднение мощности сигнала |

Источник: Table 11.1 / G.663, p.20, ITU-T G.663, [6.10]

6.5. Поляризационные свойства

6.5.1. Поляризационная модовая дисперсия (PMD)

Смотри разд. 6.3.4, который может служить введением в PMD.

6.5.1.1. Эффекты ухудшения передачи

В цифровых системах принципиальное влияние PMD заключается в том, что она вызывает *межсимвольные искажения* (ISI). Примерная оценка этого явления - ухудшение показателей системы примерно на 1 дБ происходит при полной дисперсии примерно $0,4 T$, где T — один битовый период. В соответствии с [6.10] это приемлемое значение для максимально допустимого ухудшения качества системы. Хотя и нет окончательного решения (см. [6.10]), но текущий уровень исследований указывает, что оптические волокна и кабели будут оцениваться средним уровнем поляризационной модовой дисперсии — ПМД, обзор одноканальных и многоканальных систем также показывает, что и они будут оцениваться аналогичным средним показателем. Это соответствует величине средней дифференциальной групповой задержки, равной одной десятой битового периода, $0,1 T$. Компьютерное моделирование показывает, что если ПМД имеет максвелловское распределение со средним значением не выше $0,1 T$, то с вероятностью меньшей, чем 10^{-9} , ухудшение показателей системы не превысит 1 дБ.

Более того, в рекомендации [6.10] установлено, что в системах с усилителями и длинными пролетами/секциями, применяющими *скремблеры поляризации* (устройства, принудительно модулирующие состояние поляризации лазерного сигнала так, чтобы он казался неполяризованным), ПМД вызывает увеличение степени поляризации такого сигнала. Это, в свою очередь, ухудшает показатели системы, благодаря взаимодействию с потерями, обусловленными поляризацией, и поляризационному провалу усиления (см. ниже).

В аналоговых системах взаимодействие потерь и модовой дисперсии с лазерным чирпом приводит к появлению искажений второго порядка, пропорциональным частоте модуляции. Дальнейшее ухудшение от эффектов второго порядка, не зависящих от частоты модуляции, происходит тогда, когда в системе присутствуют дополнительные потери, обусловленные поляризацией.

Известно также, и было кратко упомянуто выше, что эффект второго порядка может объединить ПМД и хроматическую дисперсию. Это обусловлено зависимостью дифференциальной групповой задержки от длины волны. Она приводит к статистическому вкладу в хроматическую дисперсию. Это, пока еще, понимается недостаточно четко, и этот вопрос находится в стадии изучения.

6.5.1.2. Возможности снижения этих эффектов

Было установлено, что ПМД возникает благодаря индуцированному двойному лучепреломлению, поэтому большие усилия, направленные на снижение влияния ПМД, были сконцентрированы на минимизации двойного лучепреломления, вносимого в процессе производства волокна и кабеля. Различные меры были приняты для оптимизации процесса производства, чтобы быть уверенным в концентричности (округлости) сердцевины волокна. Оптические кабели производятся в настоящее время с использованием материалов и процессов, которые минимизируют остаточные напряжения в структуре кабеля (поперечном сечении его сердечника). Можно также использовать тщательно продуманную кабельную структуру, позволяющую ввести круговую составляющую в индуцированное двойное лучепреломление. При аккуратном проектировании такая продуманная структура может противодействовать возникновению линейного двойного лучепреломления, что приведет к созданию кабеля с результирующей нулевой ПМД. Типичное среднее значение ПМД волокон и кабелей лежит в диапазоне

$$0 < (\Delta\tau) < 0,5 \text{ пс} / \sqrt{\text{км}}$$

Другой метод основан на использовании *концепции основных состояний*, введенных ранее. В этой схеме в начальной и конечной точках системы вводится контроллер поляризации. На выходном контроллере поляризации установлен расщепитель поляризованного луча, используемый для генерации сигнала ошибки. Выходной поляризатор наблюдает за сигналом ошибки, а входной поляризатор настраивается так, чтобы минимизировать этот сигнал ошибки. В точке отсутствия сигнала ошибки на выходе, состояние входного поляризатора является одним из основных состояний данной системы. Используя такую технологию, можно компенсировать задержку с точностью до 1 битового периода при скорости системы в 5 Гбит/с. Аналогичная технология может быть использована для когерентных систем мультиплексирования с частотным разделением (FDM).

6.5.2. Потери, обусловленные поляризацией

Потери, обусловленные поляризацией (PDL), возникают благодаря дихроизму пассивных оптических элементов, таких как изоляторы, разветвители и т.д., расположенных на пути сигнала. Когда сигнал проходит через *дихроичный элемент*, составляющая его электрического поля, параллельная *оси потерь*, ослабляется. Как и в случае ПМД, те оси, которые определяют PDL, ориентированы случайно по отношению друг к другу.

6.5.2.1. Эффекты ухудшения передачи

Проанализируем конфигурацию типичной системы, для того чтобы идентифицировать, а затем и управлять PDL. В системе с усилителями, один из режимов управления усилителем — работа при постоянной мощности сигнала. PDL влияет как на сигнал, так и на шум. Однако, учитывая, что шум не подвергается поляризации, воздействие PDL на сигнал и шум будет различным. Шум может быть разложен на составляющую, параллельную сигналу, и составляющую, ортогональную ему. Можно показать, что объединенное действие PDL и оптического усиления сводится к тому, чтобы

усилить составляющую шума, ортогональную сигналу. Более того, амплитуда ортогональной составляющей шума изменяется во времени аналогично тому, как поляризация сигнала изменяется под действием ПМД. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и величины Q на входе приемника. В дополнении к этому, флуктуации сигнала во времени приводят к явлению фединга отношения сигнал/шум и величины Q на входе приемника. Обе причины ведут к ухудшению показателей системы.

В аналоговых системах PDL может взаимодействовать с лазерным чирпом и ПМД и снижать показатели системы в терминах составных искажений второго порядка. Как можно было бы ожидать, эти искажения меняются во времени и приводят к флуктуациям показателей во времени в системах с составными искажениями второго порядка.

6.5.2.2. Возможности снижения этих эффектов

Во-первых, нужно заметить, что влияние PDL на показатели системы растет с ростом числа усилителей. В системах с подводными кабелями, имеющими длинные пролеты/секции, требования особенно жесткие, так как число усилителей в тандемном соединении может исчисляться сотнями. В наземных системах с короткими пролетами/секциями число усилителей в тандемном соединении составляет единицы. Влияние PDL на показатели системы все еще находится в стадии изучения организацией ITU-T (МСЭ).

6.5.3. Поляризационный провал усиления

Поляризационный провал усиления (РНВ) является результатом анизотропного насыщения, созданного поляризованным сигналом насыщения, вводимым в эрбиево волокно. Это приводит к снижению населенности возбужденных состояний, ориентированных поляризованным полем. Следовательно, допустимое усиление в ортогональном направлении выше. Хотя эрбиевые ионы распределены случайно в матрице стекла, на микроскопическом уровне диполь, ассоциируемый с эрбиевым ионом,

является анизотропным. РНВ-эффект максимален там, где линейно поляризованный насыщенный сигнал ориентирован в направлении главной оси диполя, и уменьшается там, где состояние поляризации насыщенного сигнала — эллиптическое или круговое. Как сигнальный лазер, так и лазер накачки, вносят свой вклад в этот общий эффект. Полное дифференциальное усиление является векторной суммой двух этих вкладов. Степень провала усиления пропорциональна степени поляризации насыщенного сигнала. Для неполяризованного насыщенного сигнала не существует провала усиления. В принципе, это похоже на случай сигнала с круговой поляризацией.

6.5.3.1. Эффекты ухудшения передачи

РНВ влияет на показатели системы тем, что вызывает нарастание мощности шума вдоль цепочки усилителей в большей степени, чем это предсказывается линейной теорией. Это значит, что РНВ уменьшает отношение сигнал/ шум; как в случае ПМД и PDL, а измеренная добротность Q изменяется во времени (флуктуирует). Учитывая, что действие РНВ обусловлено суммой двух вкладов, существуют два пути, по которым осуществляется воздействие на показатели системы. Общий эффект пропорционален усилению насыщения и возрастает с ростом степени насыщения.

Прежде всего мы снизим влияние поляризованного лазера накачки. Рассмотрим случай, когда поляризация накачки фиксирована и инвариантна. Накачка вызывает дифференциальное усиление в направлении, ортогональном оси поляризации. Шум, ориентированный ортогонально накачке, испытывает большее усиление, чем шум, ориентированный в направлении накачки. Однако, оси поляризации лазеров накачки каждого из усилителей в цепочке не коррелированы друг с другом. Поэтому накопленный эффект формируется, как при случайном блуждании, и индуцированный накачкой РНВ может рассматриваться как вклад в PDL данного усилителя. Следовательно, среднее значение нарастания шума, рассмотренное на группе из

нескольких усилителей, должно быть линейным, как это и предсказывается простой теорией.

Влияние РНВ, индуцированной сигнальным лазером, несколько отличается от рассмотренного. При распространении лазерного сигнала вдоль системы, шум, поляризованный вдоль оси параллельной оси распространения лазерного сигнала, будет испытывать то же усиление, что и сам сигнал. Однако, шум поляризованный ортогонально лазерному сигналу, будет испытывать большее усиление, так как он всегда будет ортогонален оси поляризации сигнала. Поэтому общий шум будет увеличиваться нелинейно от усилителя к усилителю.

Общее дифференциальное усиление, благодаря действию РНВ, изменяется с изменением состояния поляризации сигнала (благодаря ПМД) вдоль цепочки усилителей. Оно меняется, так как эффект провала усиления сигнала коррелирован с эффектом накачки. Амплитуда дифференциального усиления изменяется в соответствии с изменением относительных состояний поляризации сигнального лазера и лазера накачки. Поэтому, хотя общий шум изменяется нелинейно при движении по цепочке усилителей, он при этом еще и флуктуирует во времени. Следовательно, как мы уже объясняли выше, отношение сигнал/шум уменьшается и флуктуирует во времени. Добротность системы Q также при этом ухудшается и флуктуирует во времени.

6.5.3.2. Возможности снижения этих эффектов

Один из путей ослабить влияние РНВ — работать с меньшими уровнями сигнала в усилителях. Однако во многих случаях это или невозможно, или нежелательно. В рекомендации [6.10] предлагается воспользоваться простым подходом — использовать деполяризованный сигнал. Деполяризованный сигнал может генерироваться многими способами, но наиболее часто используемым является *способ скремблирования поляризации*. Используя фазовый модулятор, можно изменять состояние поляризации во времени между двумя ортогональными

состояниями. Полученный таким образом сигнал кажется деполаризованным. Практика показывает, что оптимальным является использование в качестве частоты модуляции эквивалент удвоенной скорости передачи. Это объясняется тем, что PDL в усилителе конвертирует модуляцию состояния поляризации в амплитудную модуляцию. Используя в качестве частоты модуляции эквивалент удвоенной скорости передачи, мы получаем флуктуации амплитуды со скоростью выше, чем полоса частот детектора, т.е. она не воспринимается приемником. Используя этот прием, можно улучшить показатели систем с длинными пролетами/секциями до таких величин, когда с большой вероятностью будут достигаться нужные показатели. Модуляция состояния поляризации в настоящее время широко практикуется в трансокеанских системах передачи с усилителями.

Однако в системах большой протяженности с усилителями, ПМД вызывает реполяризацию сигнала, вновь позволяя РНВ, таким образом, снова вызывать ухудшение показателей системы. Этот феномен показывает насколько сложна природа взаимодействия поляризации в звеньях передачи, использующих усилители.

6.6. Другие типы ухудшений системы передачи

6.6.1. Накопленный шум, связанный с оптическим усилением

При наличии каскадного соединения ряда ОУ (см. разд. 7.4.2), расположенных вдоль ВОЛС, шум ASE, генерируемый в ОУ, повторяет цикл ослабления и усиления аналогично тому, как это происходит с информационным сигналом. Учитывая, что входящий шум ASE усиливается каждым ОУ, и то, что он добавляется к шуму, который генерируется этим конкретным ОУ, можно предположить, что общая мощность шума ASE увеличивается почти пропорционально числу ОУ, а мощность сигнала уменьшается на эту же величину. В рекомендации [6.10] указано, что

мощность шума может превысить мощность сигнала.

Профиль спектра шума ASE также изменяется при переходе от усилителя к усилителю. Если шум ASE от первого ОУ является входным для второго ОУ, профиль усиления второго усилителя изменяется за счет мощности шума этого ASE, благодаря эффекту насыщения усиления. Аналогично этому, профиль усиления третьего ОУ также модифицируется выходным спектром мощности второго ОУ. Такой эффект повторяется на каждом каскаде ОУ вплоть до последнего. Шум ASE накапливается, даже если в каждом ОУ используются узкополосные фильтры, так как шум существует во всем диапазоне частот, который включает и частоту сигнала.

6.6.1.1. Эффекты ухудшения передачи

Накопление шума ASE влияет на отношение сигнал/шум системы, потому что благодаря (главным образом) шуму биений, связанному с ASE, происходит ухудшение отношения сигнал/шум принятого сигнала. Такой шум биений растет линейно с ростом числа используемых ОУ. В результате, коэффициент ошибок ухудшается с ростом числа ОУ. Более того, шум накапливается экспоненциально в зависимости от усиления усилителя.

В результате, в спектре шума ASE, после прохождения через большое количество усилителей, имеющих определенный спектр усиления, появляется характерный пик на некоторой длине волны, благодаря *эффекту самофильтрации* (см. разд. 6.6.2). Если, например, рассматривается замкнутая кольцевая оптическая сеть, то ожидаемое накопление шума ASE такое, как если бы использовалось бесконечное число ОУ. Хотя накопление шума ASE в системах с фильтрацией шума, существенно уменьшается благодаря наличию фильтров, внутриполосный шум тем не менее растет с ростом числа каскадов ОУ. В результате, отношение сигнал/шум ухудшается с ростом числа ОУ.

6.6.1.2. Возможности снижения этих эффектов

Накопление шума ASE можно уменьшить путем уменьшения расстояния между усилителями, если поддерживать, в то же время, общее усиление равным общим потерям на тракте передачи, так как шум накапливается экспоненциально в зависимости от усиления усилителя (которое при этом снижается). Существуют две технологии фильтрации, которые могут уменьшить шум ASE:

1. Фильтры шума ASE.
2. Эффект, или метод, самофильтрации.

Метод самофильтрации используется тогда, когда применяется 10 или больше ОУ последовательно. В этом методе проектировщик системы настраивает системную длину волны на длину волны самофильтрации так, что происходит снижение шума ASE на входе детектора. Это похоже на использование узкополосного фильтра. Рекомендация [6.10] сообщает, что этот метод очень эффективен для снижения начального шума ASE, если используется на укороченных пролетах и для ОУ с малым усилением.

Не рекомендуется использовать метод самофильтрации на сетях WDM с топологией замкнутого кольца при использовании ОУ. Принципиальная причина этого в том, что возникает результирующий пик усиления в спектре усиления ОУ, который может оказать значительное влияние на показатели системы. В этом случае рекомендуется использовать фильтры ASE, минимизирующие шум ASE. Это достигается путем фильтрации каналов WDM, не предназначенных для использования на данном узле сети.

Если в тандемном соединении используется только несколько усилителей, то метод самофильтрации менее эффективен, чем метод фильтров ASE. Этот последний метод является более гибким в плане выбора рабочих длин волн, с ним легче обеспечить уровень однородности каналов в системах WDM. В рекомендации [6.10] советуют тщательно выбирать характеристики фильтра. Следует отметить, что полоса пропускания каскада фильтров уже, чем полоса одного фильтра, если только она не является прямоугольной. В

одноканальных системах большой дальности могут быть использованы обычные фильтры, имеющие полосу пропускания на уровне половины максимума порядка 3 нм.

6.6.2. Эффект самофильтрации

Существует характеристический профиль спектра усиления (или спектр ASE шума) в результате накопления шума ASE благодаря каскаду ОУ. Этот спектр имеет пик и спектральная ширина этого пика уменьшается с ростом числа ОУ, пока этот процесс не достигнет насыщения при определенном числе усилителей. Это может привести к формированию спектральной линии шириной 2-3 нм при использовании нескольких десятков ОУ. Этот эффект и носит названия *самофильтрации*.

Рекомендация [6.10] сообщает, что эффект самофильтрации определяется формой спектра эмиссии, сечением поглощения и степени инверсии ОУ. Длина волны самофильтрации может изменяться в зависимости от состава используемого стекла, входной оптической мощности или потерями между ОУ и их зависимостью от длины волны, волны накачки и длины легированного волокна. Проектировщики систем считают, что эффект самофильтрации может быть желателен в одноволновых системах, но не желателен в системах WDM.

6.6.2.1. Эффекты ухудшения передачи

Если используется несколько усилителей в тандеме, спектральная ширина пика усиления самофильтрации остается достаточно широкой и это не приводит к уменьшению накопления шума ASE. Уменьшения не происходит, даже если рабочая длина волны подстраивается к пиковой волне самофильтрации. Может оказаться достаточно сложным воспользоваться преимуществом эффекта самофильтрации, благодаря большому количеству усилителей в тандеме. Величина сигнал/шум может быть выше, но может и ухудшаться, если рабочая длина волны сдвигается в сторону от позиции

волны самонастройки. Как правило, такой сдвиг может произойти после реконфигурации или ремонта, ввиду изменения потерь между усилителями.

В случае систем WDM/DWDM, при каскадировании ОУ может возникать изменение уровней каналов, которое экспоненциально растет с ростом числа ОУ в тандеме (показателем экспоненты является число ОУ). В [6.10] приводится пример, в котором распределение мощности среди 5 каналов имело неравномерность ~3 дБ после одного ОУ, оно увеличивалось до ~15 дБ после использования 6 ОУ. В системах WDM изменение общего числа каналов приводит к изменению спектра усиления, которое оказывает возмущающее воздействие на другие каналы. Кроме того, спектрально зависимое усиление, наведенное насыщением, также вызывает изменение усиления между каналами.

Рекомендуется тщательно рассчитывать бюджет звена, чтобы приспособиться к таким изменениям спектрального усиления ОУ типа EDFA, как в системах с фильтрами, так и без. Следует отметить, что фильтры ASE обычно снимают эту проблему. Этот метод описан в разд. 6.6.2.2.

6.6.2.2. Учет эффекта самофильтрации

Использование метода самофильтрации для улучшения отношения сигнал/шум наиболее эффективно тогда, когда длина волны оптимальной дисперсии, длина волны самофильтрации и рабочая длина волны одинаковы. Этот метод не требует использования фильтров ASE, которые могут вызвать деградацию, ассоциируемую с PDL в данном фильтре. Это в первую очередь относится к трансокеанским системам. Как упоминалось выше, ориентирование на использование эффекта самофильтрации усложняет проектирование системы, ее реконфигурацию и ремонт, потому что рабочая длина волны должна всегда настраиваться так, чтобы совпадать с длиной волны самофильтрации, которая меняется. Спектральные характеристики усиления ОУ и потерь между усилителями должны быть однородны настолько, насколько это возможно. В противном случае пик усиления само-

фильтрации может оказаться недостаточно узким, что приведет к уменьшению желаемого отношения сигнал/шум. Это также осложняет возможность предотвращения индуцируемого ASE насыщения в системах большой протяженности.

Метод ASE-фильтра является той альтернативой, которая позволяет избежать этих недостатков в снижении эффекта накопления шума ASE при использовании полосы фильтра, настроенной на рабочую длину волны. Узкополосные фильтры с величиной FWHM < 1 нм теперь широко доступны. Использование метода ASE-фильтра позволяет минимизировать накопление ASE-шума. Следовательно, система освобождается от ограничений, таких как сложность проектирования, реконфигурации и ремонта, а также освобождается от необходимости использовать короткие пролеты и однородные характеристики ОУ.

В системах WDM появление дополнительной мощности между каналами, распределенной благодаря эффекту самофильтрации, можно избежать за счет использования физически отдельных для каждого канала усилителей. Указывается только, что этот метод требует более дорогого демультиплексора, отдельного ОУ и мультиплексора. Альтернативой является использование выравнивания мощности оптических каналов для каждого узла сети, хотя этот метод требует дополнительных устройств управления и более критического бюджета мощности в системе. Другой подход — использовать менее насыщенные и менее строго инвертированные ОУ, так как это делает ослабление менее зависимым от длины волны и, тем самым, уменьшает неравномерность распределения мощности между каналами. В строго инвертированном каскаде ОУ, типа EDFA, ASE растет, с ростом числа EDFA, в районе первого пика усиления -1530 нм и должна быть устранена с помощью коротковолнового режекторного фильтра. Дополнительно может использоваться метод предварительной минимизации разницы отношения сигнал/шум между каналами для всех каналов путем подстройки уровня передаваемой оптической мощности для каждого канала на основе исполь-

зования сигналов обратной связи с каждого из удаленных оконечных терминалов.

Разделы 6.4 — 6.6 написаны на основе материала в Appendix II, ITU-T G.663, см. [6.10].

6.7. Выбор оптических фильтров по их дисперсионным характеристикам

В тексте мы уже упоминали 4 типа специального одномодового волокна:

1. Обычное одномодовое волокно.
2. Волокно со сдвигом нулевой дисперсии (DSF).
3. Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZ-DSF).
4. Волокно с уплощенной/выровненной дисперсией (DFF).

Различают два типа дисперсии в одномодовом волокне:

1. Материальная дисперсия (D_M), вызванная зависимостью показателя преломления от длины волны.

2. Волноводная дисперсия (D_W), являющаяся результатом зависимости от длины волны распределения света фундаментальной моды в сердцевине и оболочке, и вследствие этого разницы показателей преломления.

Хроматическая дисперсия является суммой этих двух типов дисперсии.

Напомним, что для длин волн больших 1300 нм эти две дисперсии в кварцевом стекле имеют противоположные знаки. При использовании легирующих добавок материальная дисперсия может изменяться лишь незначительно. С другой стороны, на волноводную дисперсию оказывает большое влияние использование различных профилей показателя преломления.

Как было описано в гл. 1 и 2, профиль показателя преломления обычного одномодового волокна имеет вид ступеньки с разницей в показателе преломления, равной Δ . Для этого типа профиля обычного одномодового волокна хроматическая дисперсия (сумма материальной и

волноводной дисперсии) равна нулю для длины волны примерно 1310 нм.

Так как вклад волноводной дисперсии D_w зависит от таких параметров волокна, как радиус сердцевинки a и разницы в показателе преломления Δ , то можно сдвинуть длину волны нулевой дисперсии на другую длину волны. Одной из наиболее желательных длин волн является 1550 нм, в силу низкого уровня потерь на этой длине волны. Этот тип волокна описан в рекомендации ITU-T G.653, тогда как обычное одномодовое волокно описано в рекомендации G.652.

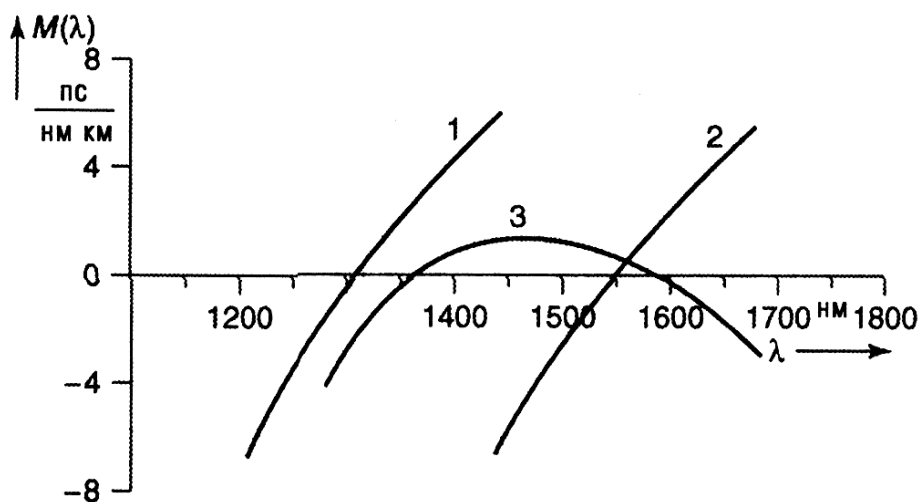


Рис. 6.7. Зависимость хроматической дисперсии от длины волны. (С разрешения компании Siemens, см. [6.9], рис. 4.11, с.48)

Технология сдвига дисперсии позволяет также создать *волокно с уплощенной или компенсированной дисперсией*, для которого значения дисперсии малы для целого диапазона длин волн от 1300 до 1600 нм. На рис. 6.7 показана хроматическая дисперсия в зависимости от длины волны для обычного одномодового волокна (1), для волокна со сдвигом дисперсии (2) и для волокна с уплощенной дисперсией (3). Волокно с уплощенной дисперсией описано в рекомендации ITU-T G.655.

Для того, чтобы сдвинуть длину волны нулевой дисперсии в направлении другой волны, должны быть изменены волноводная дисперсия и профиль показателя преломления оптического волокна. В результате мы приходим к *многоступенчатому* или *сегментированному профилю*

показателя преломления. На рис. 6.8 (а) показан обычный профиль показателя преломления (т.е. простой ступенчатый профиль, или выровненный показатель преломления оболочки), а на рис. 6.8(б) показан вдавленный профиль показателя преломления с уменьшенным показателем преломления в области оболочки (вдавленная/профильная оболочка).

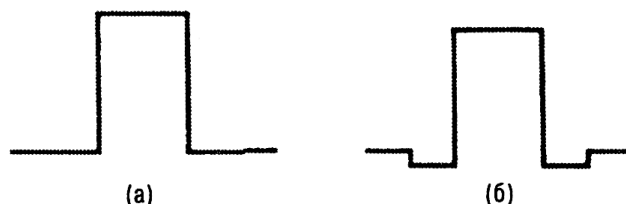


Рис. 6.8. Профиль для оптических волокон без сдвига дисперсии (обычное одномодовое волокно), (а) стандартный ступенчатый профиль; (б) ступенчатый профиль с уменьшенным показателем преломления. (С разрешения компании Siemens, см. [6.9], рис. 4.12, с.49)

На рис. 6.9 показаны различные варианты профиля оптического волокна со сдвигом дисперсии. На рис. 6.9(а) показан сегментированный профиль с треугольным профилем показателя преломления в области сердцевины (сегментированный профиль сердцевины), на рис. 6.9(б) показан простой треугольный профиль и на рис. 6.9(в) показан сегментированный профиль с двойным ступенчатым изменением показателя преломления в оболочке, также называемой двойной оболочкой. На рис. 6.10 показан профиль показателя преломления, спроектированный для волокна с уплощенной дисперсией. Сегментированный профиль с четырьмя ступеньками в профиле показателя преломления оболочки (называемый также четырехкратной оболочкой) показан на рис. 6.10(а). На рис. 6.10(б) показан так называемый W-профиль (двойная оболочка).

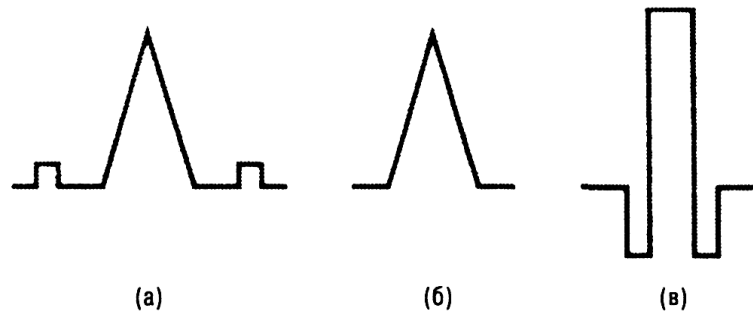


Рис. 6.9. Профиль для оптических волокон со сдвигом дисперсии, (а) сегментированный профиль с треугольником в области сердечника (сегментированный сердечник); (б) треугольный профиль; (в) сегментированный профиль с двойным ступенчатым показателем преломления. (С разрешения компании Siemens, см. [6.9], рис. 4.13, с.49)

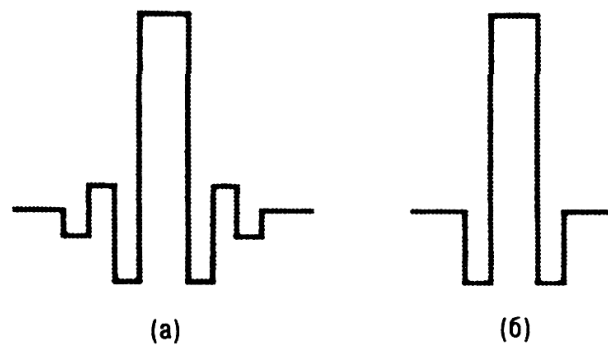


Рис. 6.10. Профиль для оптических волокон с уплощенной дисперсией, (а) сегментированный профиль с четырьмя ступеньками в профиле показателя преломления оболочки (четырёхкратная оболочка); (б) W-профиль (двойная оболочка). (С разрешения компании Siemens, см. [6.9], рис. 4.14, с.50)

6.7.1. Характерные параметры одномодового ОВ, соответствующего стандарту ITU-T G.652

Стандарт ITU-T G.652 [6.5] описывает одномодовое оптическое волокно, имеющее точку нулевой дисперсии на длине волны 1310 нм и, следовательно, оптимизированное для использования в окне прозрачности 1310 нм. Оно также может быть использовано в окне прозрачности 1550 нм, где оно не оптимизировано. Характерные параметры волокна ITU-T G.652

приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Характерные параметры одномодового ОВ по стандарту ITU-T G.652

| Параметр | Значение | Комментарий |
|---|--|--|
| Диаметр модового поля (1310 нм) | 8,6 - 9,5 мкм | 10 мкм используется для выровненного показателя преломления оболочки, 9 мкм — для профильного показателя преломления |
| Диаметр оболочки | 125 мкм ± 2 мкм | |
| Ошибка concentричности модового поля (1310 нм) | не больше 1 мкм | |
| Некруглость оболочки | < 2% | |
| Максимальная длина волны отсечки кабеля | 1260 или 1270 нм | |
| Прирост затухания при изгибах | < 1 дБ | возрастание потерь для 100 витков радиусом 37,5 мм при 1550 нм |
| Коэффициент затухания | < 0,5 дБ/км (1310 нм) < 0,4 дБ/км (1550 нм) | |
| Коэффициент хроматической дисперсии | 0 для длин волн в диапазоне 1300-1324 нм | Мак. Значение $S_{0max} = -0,093$ пс/нм ² /км в точке нулевой дисперсии |
| Максимальный коэффициент хроматической дисперсии: 1288- 1339нм 1271 - 1360 нм | 3,5 пс/нм/км 5,3 пс/нм/км | |
| Коэффициент ПМД | < 0,5 пс/Цкм | Понижает произведение: скорость передачи x длина передачи |

Источник. Материал основан на информации, приведенной в стандарте ITU-T G.652 [6.5].

Для оценки максимальной дисперсии в окне 1550 нм достаточно вычислить дисперсионный параметр $D_1(\lambda)$:

$$D_1(\lambda) = S_{0\max} / 4 \left[\lambda - (\lambda_{0\min}^4 / \lambda^3) \right]$$

где S_0 — наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии.

6.7.2. Характерные параметры одномодового ОВ с сдвигом нулевой дисперсии, соответствующего стандарту ITU-T G.653

Стандарт ITU-T G.653 [6.3] описывает одномодовое оптическое волокно со сдвигом нулевой дисперсии на длину волны 1550 нм, дисперсионный параметр при этом монотонно возрастает с длиной волны. Волокно оптимизировано для использования в диапазоне длин волн от 1550 до 1600 нм, но также может быть использовано в окне 1310 нм при тех ограничениях, которые описаны в указанной рекомендации. Характерные параметры волокна ITU-T G.653 приведены в табл. 6.3.

6.7.3. Характеристики одномодового ОВ со сдвигом волны отсечки, соответствующего стандарту ITU-T G. 654

Рекомендация ITU-T G.654 [6.8] описывает одномодовое волокно, имеющее длину волны нулевой дисперсии около точки 1300 нм и сдвинутую точку отсечки. Оно минимизировано по уровню потерь около точки 1550 нм и оптимизировано для использования в диапазоне 1500 — 1600 нм. Характерные параметры волокна ITU-T G.654 приведены в табл. 6.4.

6.7.4. Характерные параметры одномодового ОВ с ненулевой смещенной дисперсией, соответствующего стандарту ITU-T G.655

Рекомендация ITU-T G.655 [6.6] описывает одномодовое волокно, для которого требуется иметь абсолютное значение хроматической дисперсии больше, чем некоторое малое ненулевое значение во всем диапазоне рабочих длин волн. Такое значение дисперсии подавляет рост четырехволнового смешения - нелинейный эффект, который может быть особенно

разрушительным для DWDM. Волокно оптимизировано для использования в диапазоне 1500 -1600 нм. Характерные параметры волокна ITU-T G.655 приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.3

Характерные параметры одномодового ОВ по стандарту ITU-T G.653

| Параметр | Значение | Комментарий |
|---|---|--|
| Диаметр медового поля (1550 нм) | 7,8 - 8,5 мкм | отклонение не превышает 10 % |
| Диаметр оболочки | 125 мкм ± 2 мкм | отклонение не превышает 2 мкм |
| Ошибка concentричности медового поля (1550 нм) | не больше 1 мкм | некоторые применения допускают ошибки на уровне до 3 мкм |
| Некруглость оболочки | < 2% | |
| Максимальная длина волны отсечки кабеля | 1270 нм | рекомендованное значение |
| Прирост затухания при изгибах | < 0,5 дБ | возрастание потерь для 100 витков радиусом 37,5 мм при 1550 нм |
| Коэффициент затухания | < 0,35 дБ/км (1550 нм) | < 0,55 дБ/км (1310 нм) |
| Наклон хроматической дисперсии | $S_{0max} < 0,085$ пс/нм ² /км | $D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)S_0$, где λ - требуемая длина волны между 1525 и 1575 нм |
| Максимальный коэффициент хроматической дисперсии | 3,5 пс/нм/км | |
| Номинальная длина волны нулевой дисперсии λ_0 | 1550 нм | |

Источник. Материал основан на информации, приведенной в стандарте ITU-T G.653 [6.3].

Таблица 6.4

Характерные параметры одномодового ОВ по стандарту ITU-T G.654

| Параметр | Значение | Комментарий |
|--|---|--|
| Диаметр модового поля (1550 нм) | 10,5 мкм | отклонение не превышает 10% |
| Диаметр оболочки | 125 мкм ± 2 мкм | |
| Ошибка концентричности модового поля | не больше 1 мкм | для 1550 нм |
| Некруглость оболочки | < 2% | |
| Длина волны отсечки ($\lambda_c =$ отсечка волокна) | < 1600 нм | если нижний предел > 1350 нм |
| Длина волны отсечки кабеля (λ_{cc}) | 1530 нм (максимальное значение) | рекомендованное значение |
| Прирост затухания при изгибах | < 0,5 дБ | возрастание потерь для 100 витков радиусом 37,5 мм при 1550 нм |
| Коэффициент затухания | < 0,22 дБ/км | в диапазоне 1550 нм для 1550 нм |
| Наклон хроматической дисперсии | $S_{0max} < 0,07 \text{ пс/нм}^2/\text{км}$ | |
| Максимальный коэффициент хроматической дисперсии | 20 пс/нм/км | |
| Коэффициент ПМД | < 0,5 пс/км ^{1/2} | соответствует длине передачи 400 км для скорости 10 Мбит/с |

Источник. Материал основан на информации, приведенной в стандарте ITU-T G.654 [6.8].

Таблица 6.5

Характерные параметры одномодового ОВ по стандарту ITU-T G.655

| Параметр | Значение | Комментарий |
|--------------------------------------|----------------------------|--|
| Диаметр модового поля (1550 нм) | 8 —11 мкм | отклонение не превышает 10 % |
| Диаметр оболочки | 125 мкм ± 2 мкм | |
| Ошибка concentричности модового поля | не больше 1 мкм | для 1550 нм |
| Некруглость оболочки | < 2% | |
| Длина волны отсечки кабеля | 1480 нм | в худшем случае 1470 нм |
| Прирост затухания при изгибах | < 0,5 дБ | возрастание потерь для 100 витков радиусом 37,5 мм при 1550 нм |
| Коэффициент затухания | < 0,35 дБ/км | |
| Коэффициент хроматической дисперсии | от 0,1 до 6,0 пс/ нм/км | в диапазоне от 1530 до 1565 нм |
| Коэффициент ПМД | < 0,5 пс/км ^{1/2} | соответствует длине передачи 400 км для скорости 10 Мбит/с |

Источник. Материал основан на информации, приведенной в стандарте ITU-T G.655 [6.6].

ГЛАВА 7 РЕГЕНЕРАТОРЫ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

7.1. Введение

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) начали широко использоваться в 1980-х. Каждое волокно передавало один поток импульсов, представляющих двоичные 1 и 0. Модель такой системы в 1980-х могла бы включать источник света, подключенный к нему волоконно-оптический кабель, и детектор света, удаленный на какое-то расстояние. Максимальное расстояние между источником и детектором зависело от уровня выходной мощности лазерного источника, потерь в оптических разъемах, в сростках, в волокне, а также от скорости передачи и чувствительности детектора света. Если нужно было увеличить длину линии связи, то устанавливали регенератор. Следуя этой методике, можно было бы обеспечить связь по всему континенту. Более того, емкость этой системы связи могла составлять сотни мегабит в секунду. Эта полная емкость могла бы передаваться по одному волокну в одном направлении; для обеспечения полнодуплексной связи можно было бы использовать другое волокно, для передачи в противоположном направлении. При увеличении емкости в такой системе регенераторные секции становились короче и короче. Число активных элементов в такой схеме формирования системы заметно ухудшало доступность системы в целом. Кроме этого также возрастал уровень джиггера. Регенератор в то время был не более чем приемником света, выход которого замыкался непосредственно на вход передатчика.

Когда я занялся бизнесом в области волоконно-оптических систем, мы твердо верили, что оптический сигнал не может быть усилен. Затем, в 1989 году, после многолетних исследований, на сцене появились волоконно-оптические усилители. Это расширило возможности ВОСП. При наличии уси-

ления в 20 дБ у такого усилителя волоконно-оптическая линия могла быть использована на значительно большую длину, прежде чем ей требовался бы регенератор, тем более, если можно было бы установить последовательно несколько таких усилителей. Использование усилителей позволило также использовать системы WDM, а также способствовало внедрению оптической коммутации.

Цель этой главы — обсудить использование оптического усиления и, в частности, применение усилителей на волокне, легированном эрбием (EDFA), а также усилителей Рамана. Мы начнем с обзора регенераторов, их применения в ВОСП и их стыковки с системами управления оптической сетью.

7.2. Применение регенераторов в оптических системах

Регенератор принимает искаженный оптический сигнал на свой вход и преобразует его в почти идеальную копию сигнала, похожую на ту, которая была передана предыдущим передатчиком. Этот регенерированный сигнал практически свободен от искажений. Функция регенерации выполняется полностью цифровым передатчиком и приемником. Устройство, которое мы будем рассматривать здесь - автономный регенератор. Оптические усилители не регенерируют цифровой оптический сигнал. На рис. 7.1 показана блок-схема цифрового оптического регенератора.

Системные инженеры ВОСП используют методы расчета линии на основе бюджета мощности для определения местоположения регенератора. Это такая точка, где накопленные потери линии приводят к существенному ухудшению показателей системы. Дополнительно должен учитываться некоторый запас по мощности. (См. гл. 10 по методике расчета бюджета мощности линии.)

Telcordia в своем стандарте [7.8] устанавливает, что регенератор

должен восстанавливать форму, тактовую синхронизацию и передавать оптический сигнал дальше. В ряде технических текстов сказано, что регенераторы усиливают оптический сигнал. Это не так, до тех пор пока усилительный блок специально не устанавливается на выход передатчика регенератора.

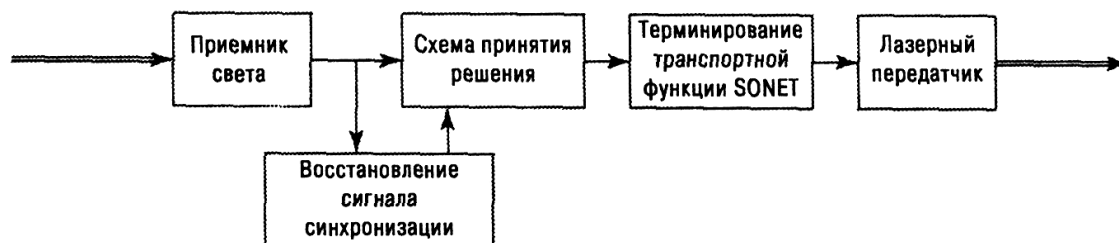


Рис. 7.1. Упрощенная блок-схема цифрового оптического регенератора

Вернемся к рис. 7.1 и проанализируем его слева направо. Вход регенератора представляет собой оптический сигнал, искаженный и ослабленный за счет накопленной дисперсии и потерь в секции, которую он прошел. Оптические импульсы, которые представляют двоичные 1, преобразуются в электрические 1, а битовые позиции, где такой импульс отсутствует или он очень мал, преобразуются в электрические двоичные 0. Этот электрический сигнал передается через электрическую схему приемника, где осуществляется восстановление сигнала тактовой синхронизации. Окончательное решение о том, что существует в той или иной битовой позиции 1 или 0, определяется в процессе демодуляции оптического сигнала. В современных системах все эти функции выполняются в интегрированном PIN-приемнике.

Двоичный сигнал передается в блок терминирования транспортной функции SONET. Здесь получают доступ к транспортному заголовку SONET, что позволяет передать центру управления сетевых операций статус регенератора и качество битового потока.

Электрический сигнал блока терминирования транспортной функции SONET передается затем лазерному передатчику, который генерирует экви-

валентные оптические импульсы, инициируемые потоком бит. Уровень оптической мощности лазерного передатчика, передаваемый в отходящее волокно, лежит в диапазоне от 0 до +3 дБм. Однако, если инженер-проектировщик волоконно-оптической линии связи хочет удлинить *пролет/секцию* (расстояние между соседними регенераторами, между регенератором и мультиплексором ввода-вывода или между регенератором и оптическим терминалом), он может разместить оптический усилитель на выходе регенератора, где сигнал может быть усилен на 20-25 дБ.

Регенератор имеет два преимущества, которых не имеет усилитель. Усилитель *не регенерирует* цифровой сигнал, тогда как регенератор делает это. Преимущество здесь состоит в том, что на вход усилителя подается сигнал, в котором аккумулированы все формы искажений. Этот же цифровой сигнал, содержащий те же самые плюс добавленные усилителем шумы и искажения, выходит из усилителя. В противоположность этому, регенератор устраняет большинство искажений и ухудшений цифрового сигнала и подает на выход прямоугольную последовательность двоичных импульсов. Второе преимущество регенератора состоит в том, что он имеет доступ к заголовку поля OA&M (управления, эксплуатации и технического обслуживания) в SONET или SDH для обеспечения статуса регенератора и битового потока, проходящего через него. Этот статус сообщается в сетевой центр управления, ответственный за данную сеть. Это обеспечивает сетевому оператору прекрасную возможность для мониторинга и технического обслуживания. Усилитель же не имеет такого легкого доступа к битовому потоку, так как он не занимается демодуляцией-ремодуляцией двоичного потока, в отличие от регенератора.

В этом разделе мы опишем автономный регенератор. Помните, что каждый приемник света и передатчик выполняет функции регенератора. Однако, кто-то может возразить, что оптический передатчик выполняет функцию *генерации*, а не *регенерации*.

Удаленные регенераторы питаются с помощью одного из следующих

методов:

1. Они могут питаться от пары проводов, протянутой от основной системы питания ближайшего мультиплексора или терминала.

2. Они могут использовать локальное питание от местной энергокомпании. Они должны иметь источники бесперебойного питания или питаться локально от солнечных батарей, небольших газотурбинных установок, ветроустановок с батарейными резервными источниками (см. гл. 13, разд. 13.8).

Удаленные ОУ должны получать питание аналогичным способом.

7.2.1. Регенераторы в сетях SONET

Регенераторы SONET, описанные в этом разделе, соответствуют спецификации Bellcore (сейчас Telcordia) TR-NWT-000917, Issue I [7.9]. Такой регенератор выполняет основные регенераторные функции, описанные в разд. 7.2. Дополнительно он имеет специальный интерфейс с заголовком SONET OA&M. Bellcore называет его оконечным оборудованием секции. Это означает, что оно (оборудование) терминирует и, в большинстве случаев, формирует вновь заголовок секции. Заголовок секции рассмотрен в гл. 9, разд. 9.2.3. В ряде случаев SONET RGTR (регенератор SONET - термин Bellcore) может ретранслировать некоторые или все секционные заголовки через RGTR. Байты заголовка, который ретранслируется, передаются в том виде, в котором принимаются. Формат секционного заголовка синхронного транспортного сигнала (STS-1, терминологию SONET см. в гл. 9, разд. 9.4) показан на рис. 7.2.

В структуре секционного заголовка (рис. 7.2) каждый STS-1, как часть STS-N, полученного в результате мультиплексирования с байт - интерливингом, имеет два байта фреймовой синхронизации (A1 и A2), байт C1 для идентификации STS-1. Байты фреймовой синхронизации содержат уникальную двоичную последовательность, используемую для идентификации начала фрейма.

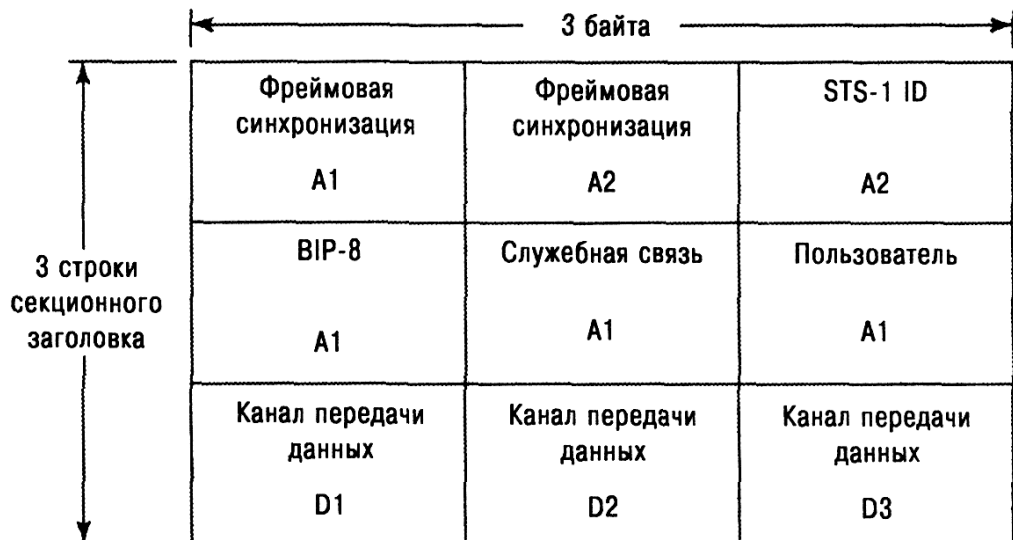


Рис. 7.2. Назначение байтов в секционном заголовке SONET для STS-1. (см. [7.12], с. 2-33)

Частью секционного заголовка также являются: B1 - байт, содержащий результат контроля четности процедурой BIP-8, E1 - байт служебной связи, F1 - байт обслуживания каналов пользователя, DCC - служебный канал передачи данных, сформированный байтами D1, D2 и D3. SONET RGTR использует BIP-8 для обнаружения ошибок, а байт F1 зарезервирован для приложений сетевых операторов. Для передачи и приема информации о функционировании системы, как правило информации типа OA&M, RGTR использует канал DCC для обеспечения встроенного канала управления (EOC) емкостью 192 кбит/с. И, наконец, байт E1 обеспечивает канал голосовой связи для пользователя крафт-терминала.

На рис. 7.3 приведена блок-схема оконечного оборудования секции (SONET STE) регенератора (RGTR). На этом рисунке, двигаясь слева направо, представлены: оптоэлектронный преобразователь (O/E блок), формирующий электрические двоичные сигналы 1 и 0, из которых восстанавливается тактовая синхронизация. Схема принятия решения определяет, является ли входной импульс (или импульсная позиция) двоичной 1 или 0. За ней следует блок фреймирования, который

устанавливает границы фрейма; при этом может осуществляться дескремблирование заголовка и могут считываться байты В1, Е1, F1, D1, D2 и D3. Секционные байты В1 считываются и сравниваются со значением, вычисленным для предыдущего фрейма. Это поддерживает мониторинг показателей качества. Вслед за этим могут быть записаны и заново скремблированы байты В1, Е1, F1, D1, D2 и D3. *Замечание:* при этом выполняются вычисления нового ВР-8 для данного фрейма, значение которого вписывается в байт В1 заголовка следующего фрейма в SONET STE RGTR. Наконец, осуществляется обратное электрооптическое (Е/О) преобразование, генерирующее выходной оптический поток бит.

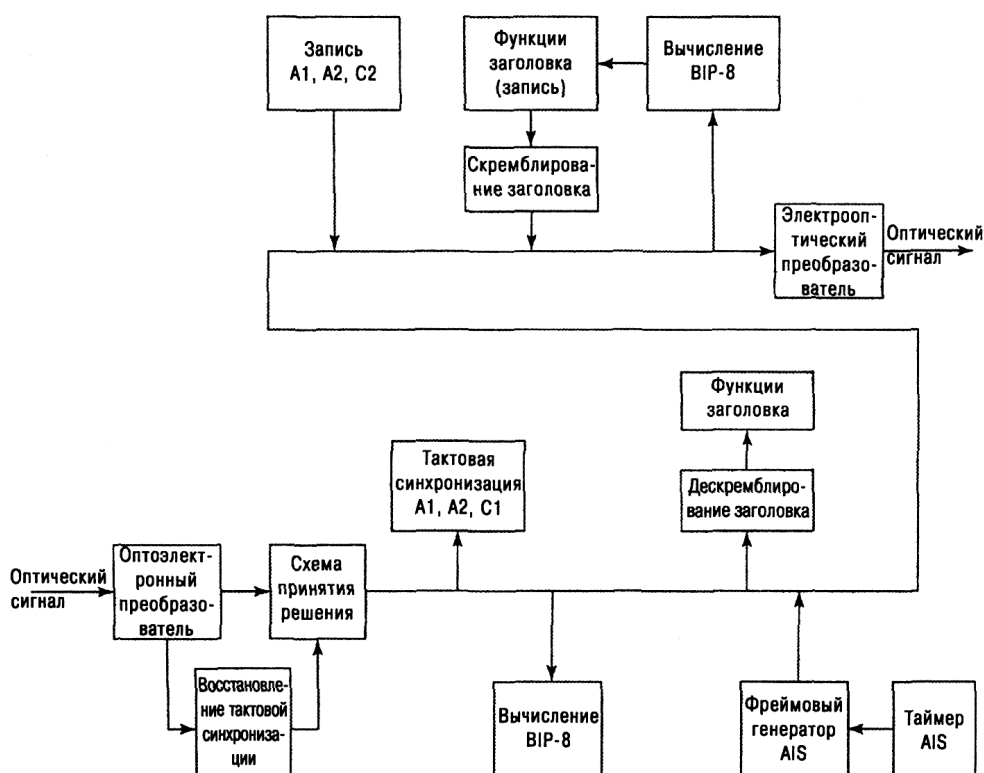


Рис. 7.3. Блок схема окончного оборудования секции (SONET STE) регенератора (см. [7.9, 7.13])

Для полноты, на рис. 7.3 показаны функции генерации линейного AIS (сигнала индикации аварийного состояния). Фреймовый генератор AIS генерирует байты фрейминга (А1 и А2), байт идентификации STS-1 (С1) и секционный ВР-8 (байт В1). Фреймовый генератор AIS генерирует байты Е1,

F1, D1, D2 и D3, если необходимо. Фреймовый генератор AIS также генерирует скремблированный (все 1) шаблон для остатка STS-N сигнала (определение STS-N см. гл. 9, разд. 9.2.1.2).

7.3. Волоконно-оптические усилители

Существуют три основных типа оптического усилителя (ОУ), которые были разработаны для использования в ВОСП: *усилители на лазерных диодах, усилители на легированном волокне и романовские усилители*. В настоящее время ОУ на легированном волокне доминируют на рынке. Для легирования используется элемент эрбий, а сами ОУ называются *усилителем на волокне, легированном эрбием (EDFA)*. Конкурирующие с ними ОУ на лазерных диодах до сих пор уступали им дороговизной производства, чувствительностью к поляризации и высоким уровнем перекрестных помех.

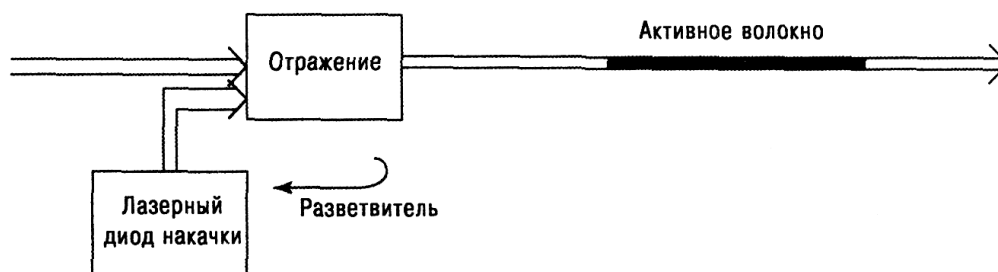


Рис. 7.4. Упрощенная схема усилителя на волокне легированном эрбием

На рис. 7.4 показана упрощенная блок-схема усилителя типа EDFA. Она содержит лишь один активный блок - блок накачки. Накачка использует обычно лазерный источник света, похожий на то, что используется в передатчике. Для промышленных усилителей EDFA используются источники накачки 980 или 1480 нм.

Конфигурация, приведенная на рис. 7.4, является элементарным мультиплексором с разделением по длине волны, где разветвитель играет роль комбайнера/мультиплексора, т.е. просто объединяет световой сигнал

накачки с рабочим оптическим сигналом. Эти два сигнала проходят через активную область (волокно), где и происходит фактическое усиление сигнала. Активная область состоит из специально приготовленного оптического волокна, которое в определенной степени легировано эрбием, редкоземельным элементом. В ОУ типа EDFA с наиболее простой схемой необходимое усиление обеспечивается в относительно узкой полосе длин волн от 1525 до 1565 нм. Однако то, что мы называем узкой полосой длин волн, обеспечивает достаточное пространство для размещения многих WDM каналов.

Одно из преимуществ такого ОУ над регенератором в том, что в многоканальной системе WDM на каждый канал требуется отдельный регенератор, тогда как на всю систему WDM требуется только один усилитель. Пусть, например, система WDM имеет 16 каналов. Тогда для этой конфигурации требуется 16 регенераторов и всего один ОУ. Более того, ОУ прозрачен по отношению к проходящему потоку бит, тогда как регенератор рассчитан на определенную скорость потока. При большой длине системы (например, больше 700 км) требуется использовать по крайней мере один регенератор для того, чтобы ослабить действие дисперсии и восстановить форму сигнала.

7.3.1. Типы волоконно-оптических усилителей

Существуют два типа волоконно-оптических усилителей: усилитель на лазерном диоде и усилитель на волокне, легированном редкоземельными элементами. Существуют также усилители Рамана и Бриллюэна. Мы остановимся, в основном, только на двух первых типах усилителей, а из них на усилителях, легированных редкоземельными элементами. Практическим примером ОУ этой группы является усилитель типа EDFA. Тем не менее, и другие типы таких усилителей находятся в стадии разработки, некоторые из них будут рассмотрены ниже.

7.3.1.1. Усилители на лазерных диодах

Существуют три типа усилителей на лазерных диодах: с *блокировкой инжекции*, типа *Фабри—Перо* и типа *бегущей волны* (TW). Первые два типа отличаются порогом генерации лазера. У оптических усилителей с лазерным диодом и блокировкой инжекции обычный лазерный диод смещен выше порога генерации лазера и работает как усилитель. Усилитель типа Фабри—Перо — усилитель с лазерным диодом, который смещен ниже порога генерации лазера. Усилитель бегущей волны (УБВ) — полупроводниковый усилитель, ограничивающие поверхности которого покрыты антиотражающим покрытием. В последнее время УБВ стал доминировать в этой группе усилителей, учитывая его прекрасные характеристики и прогресс, достигнутый в области антиотражающих покрытий. В отличие от ОУ на легированном волокне, усилители на лазерных диодах могут быть спроектированы так, чтобы хорошо работать на любой длине волны, где могут работать лазеры (т.е. передатчики).

Максимальное усиление усилителя на лазерном диоде при инжекционном токе 80 мА составляет 19 дБ, а ширина полосы на уровне -3 дБ -примерно 50 нм. Достаточно широкая полоса пропускания — одно из преимуществ полупроводниковых лазерных усилителей. Можно ожидать и более широкий спектр усиления при использовании лазеров с множественными квантовыми (потенциальными) ямами (MQW), благодаря их своеобразной структуре энергетических зон. Уровень шума этих усилителей порядка 5-7 дБ [7.1].

Существуют три различных способа размещения волоконно-оптических усилителей (ВОУ), как показано на рис. 7.5. На рис. 7.5(а) показано их использование в режиме *линейного усилителя*. В этом случае усилители устанавливаются в стратегических точках вдоль волоконно-оптического тракта для усиления сигнала до такого уровня, чтобы он соответствовал желаемому диапазону чувствительности удаленного мультиплексора ввода-вывода или оконечного приемника.

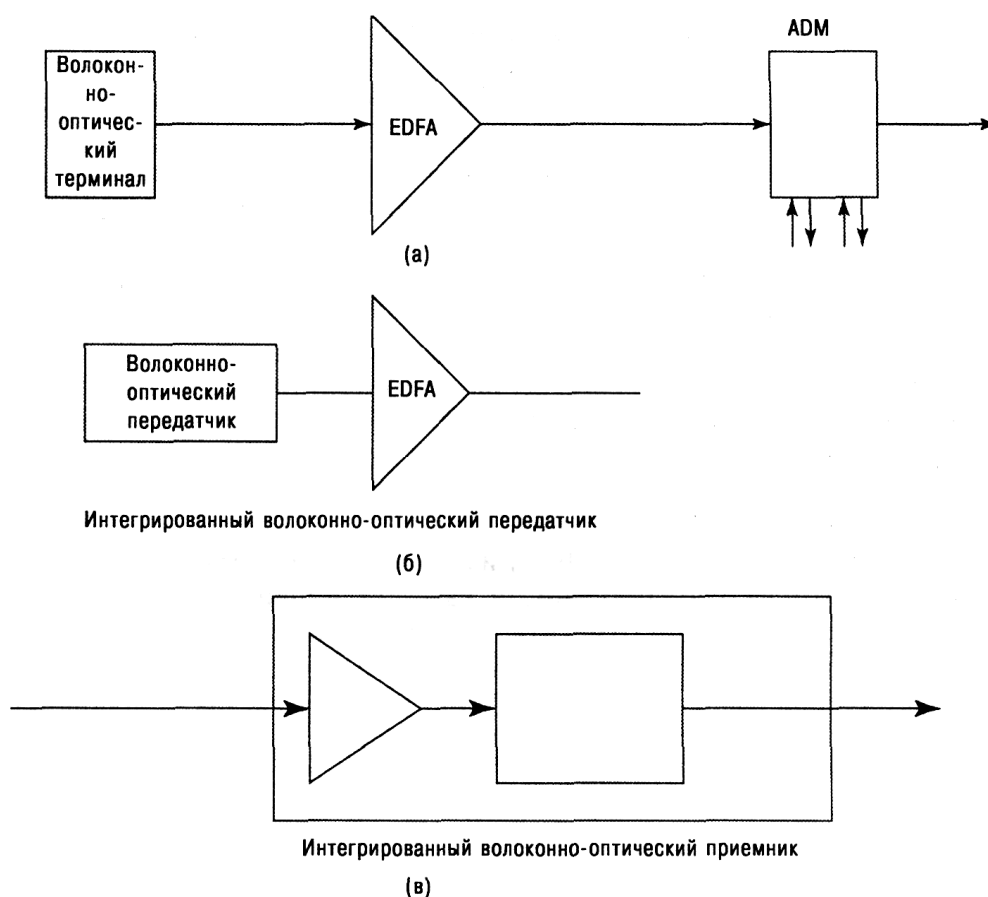


Рис. 7.5. Три различных варианта использования волоконно-оптических усилителей: (а) линейный усилитель; (б) мощный усилитель (бустер); (в) предусилитель.

На рис. 7.5(б) показан *мощный усилитель (бустер)*. При обычной конфигурации его помещают сразу за оптическим передатчиком, для увеличения мощности сигнала до уровня +15 - +20 дБм. Такие уровни сигнала необходимы либо для большой длины пролета, либо тогда, когда используется большое число пассивных элементов с существенным уровнем вносимых потерь, как например, в системах WDM.

На рис. 7.5(в) показан ВОУ, используемый в качестве *предусилителя*. В этом случае ВОУ помещается на удаленном конце тракта, непосредственно перед удаленным приемником. В большинстве случаев в такой конфигурации усилитель интегрируется с приемником. В этом случае ВОУ понижает уровень чувствительности приемника. Усилитель получает сигнал низкого

уровня, прошедший долгий путь или через ряд элементов с большим уровнем потерь, и повышает его до уровня, приемлемого для приемника.

Усилители на лазерных диодах могут использоваться во всех трех вариантах, показанных на рис. 7.5. Они могут работать в диапазоне длин волн 1310 нм, где усилители типа EDFA имеют неудовлетворительные характеристики. Известно, что усилители EDFA специально предназначены для диапазона длин волн 1550 нм.

Когда ОУ на лазерных диодах используется в качестве предусилителя (рис.7.5(в)), результирующий уровень сигнала, подаваемый на оптический приемник, оказывается таким большим, что характеристики приемника ограничиваются не столько уровнем теплового шума, сколько уровнем дробового шума. Эти предусилители ухудшают отношение сигнал/шум также за счет шума спонтанного излучения. Относительно высокий коэффициент шума (порядка 5-7 дБ) типового усилителя на лазерных диодах делает их не очень идеальными для использования в качестве предусилителя. Но даже в этом случае, они могут значительно улучшить чувствительность приемника.

Если усилитель на лазерном диоде используется в качестве мощного усилителя (бустера, рис. 7.5(б)), его выходная мощность ограничена, обычно на уровне < 10 мВт. Это объясняется его относительно малой (примерно 5 мВт) выходной мощностью насыщения.

Полупроводниковые ОУ (ПОУ) имеют ряд недостатков, которые делают непрактичным их использование в качестве линейного усилителя. Среди этих недостатков можно отметить: чувствительность к поляризации, переходные помехи между каналами (чувствительные для систем WDM), большие потери при вводе в волокно. В усилителях EDFA таких проблем нет, но они, как мы уже отмечали, могут быть использованы только в окне прозрачности 1550 нм.

7.3.1.2. Усилитель на волокне, легированном эрбием (EDFA)

Усилитель типа EDFA является одним из наиболее практичных ВОУ.

Как мы отмечали выше, его применение ограничено окном прозрачности 1550 нм. Его использование сделало возможным создание систем WDM.

Усиление в этом ОУ происходит по всей длине волокна с низкими потерями, легированного редкоземельным металлом. Для этой цели могут быть использованы ионы редкоземельных металлов, таких как эрбий, гольмий, неодим, самарий, таллий и иттербий. Они позволяют создать ВОУ, работающий на различных длинах волн от 500 до 3500 нм. На рис. 7.6 приведена подробная блок-схема усилителя типа EDFA.

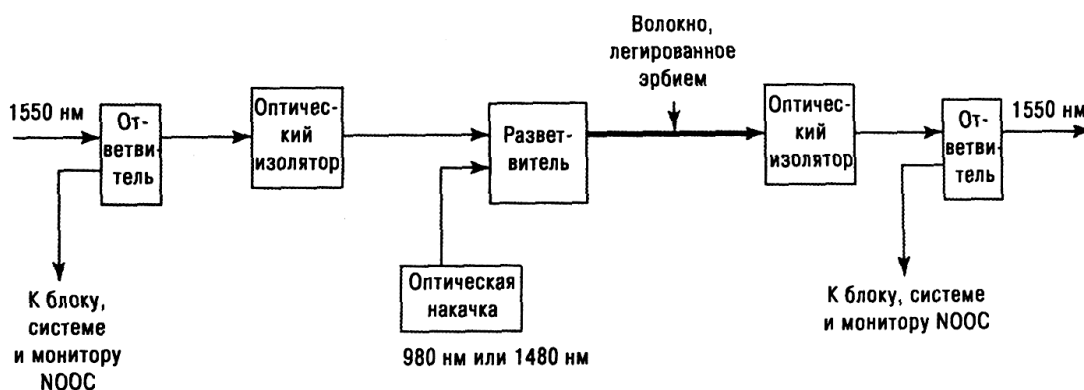


Рис. 7.6. Подробная блок-схема усилителя типа EDFA

Усилитель EDFA, показанный на рис. 7.6, состоит из двух активных элементов: активного волокна, легированного Er^{3+} , и подходящей накачки. Накачка представлена полупроводниковым лазерным передатчиком. Для подачи сигнала накачки в волокно требуется по крайней мере один разветвитель. Вид спектра типичного усилителя типа EDFA показан на рис. 7.7.

Длина волны накачки может быть 980 или 1480 нм. Кроме этого ОУ типа EDFA может использовать длины волн накачки в диапазоне 600-700 нм. Для накачки предпочтительно использовать GaAs лазерные диоды, которые достигают эффективности накачки порядка 11 дБ/мВт.

Существуют несколько различных конфигураций EDFA. Одна из них показана на рис. 7.4, где потоки накачки и сигнала распространяются в одном и том же направлении. На рис. 7.8 показаны четыре различных

конфигурации, используемые для накачки. Рис. 7.8(а) (аналогично рис. 7.4) показывает использование одного источника накачки в прямом направлении (сонаправленная накачка). Рис. 7.8 (б) показывает использование одного источника накачки в обратном направлении (противонаправленная накачка). Показатели в этом случае примерно одинаковые по сравнению с предыдущей конфигурацией, если мощность сигнала мала по сравнению с уровнем насыщения. В режиме насыщения эффективность преобразования обычно больше при использовании противонаправленной накачки, главным образом благодаря тому, что основную роль играет усиленное спонтанное излучения (ASE). Если важно иметь низкий уровень шума, то лучше использовать сонаправленную накачку.

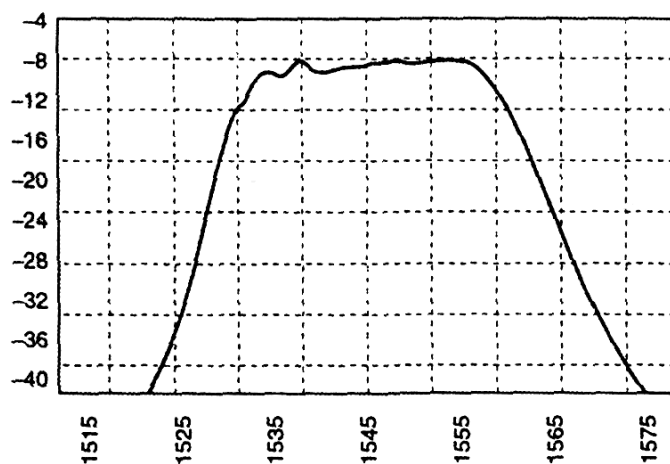


Рис. 7.7. Спектр типичного усилителя EDFA. Ширина полосы составляет около 40 нм, из которых используется только 30 нм. (С разрешения EXFO, [7.2], рис. 2.21, с. 26.)

Существует также *двунаправленная накачка*, конфигурация с двумя накачками, показанная на рис. 7.8(в), где усилитель накачивается в обоих направлениях одновременно. Обычно для противонаправленной накачки используется длина волны 1480 нм, а для сонаправленной накачки - 980 нм. Это дает возможность использовать сильные стороны каждой из них. Накачка на 1480 нм имеет более высокую квантовую эффективность, но и более высокий коэффициент шума, тогда как накачка на 980 нм может обеспечить

коэффициент шума близкий к квантовому пределу.

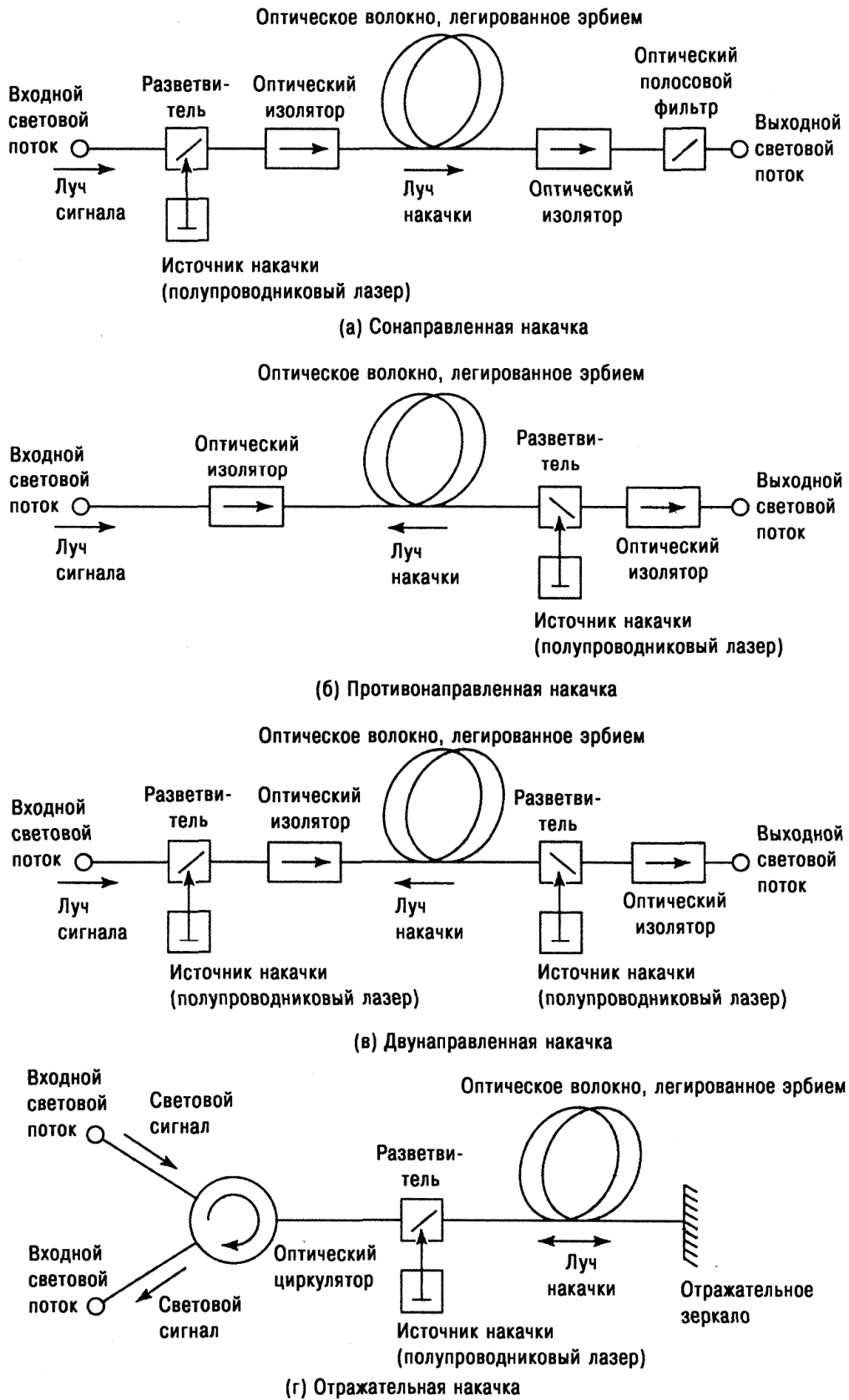


Рис. 7.8. Схемы использования усилителей типа EDFA. (Перепечатано с разрешения из [7.3], рис. 5.7, с. 97)

Обычно ОУ типа EDFA с одной накачкой обеспечивает выходную мощность порядка +16 дБм в режиме насыщения и коэффициент шума 5-6 дБ в режиме малосигнального усиления. Если одновременно используются две накачки, то можно ожидать увеличения выходной мощности до +26 дБм. Низкое, близкое к квантовому пределу, значение коэффициента шума можно поддерживать в многокаскадном варианте усилителя. При использовании такой схемы один изолятор помещается сразу после первого каскада усиления (который, обычно, определяет коэффициент шума) для защиты от ухудшения показателей первого каскада под действием ASE, которая может распространяться от второго каскада в обратном направлении [7.2].

На рис. 7.8(г) показана *отражательная накачка* с использованием на входе оптического циркулятора, направляющего входные и выходные световые потоки.

Одним из главных, при рассмотрении указанных конфигураций, является выбор длины волны накачки — 980 или 1480 нм. Сравнительный анализ этих двух длин волн накачки приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Сравнение двух длин волн накачки для усилителей EDFA

| | | |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| Длина волны | 1480 нм | 980 нм |
| Источник света | InGaAsP/InP - ЛД Ф-П | InGaAs - ЛД с супер-решеткой |
| Эффективность усиления | 5 дБ/мВт | 10 дБ/мВт |
| Коэффициент шума | - 5,5 дБ | 3-4,5 дБ |
| Выходная мощность насыщения ¹⁾ | +20 дБм | +5дБм |
| Диапазон длин волн накачки | широкий, 20 нм (1470 - 1490 нм) | узкий, 2 нм (979-981 нм) |
| Расщепление луча | трудное | легкое |
| Выходная мощность накачки | 50-200 мВт | 10-20 мВт |
| Надежность | | |

¹⁾ Зависит от мощности накачки. В настоящее время большей мощности легче достичь с накачкой 1480 нм.

Источник. Перепечатано с разрешения из [7.3], табл. 5.5, с. 106.

7.3.1.3. Варианты усилителей типа EDFA

Существуют два варианта усилителей EDFA. Они изготавливаются производителями и доступны проектировщикам ВОСП: усилители EDFA на основе кварцевого волокна, описанные выше, и усилители на основе фтористого волокна.

Они очень похожи друг на друга и отличаются только рабочим волокном, которое легируется эрбием. Они покрывают ту же область усиления: 1525-1560 нм с теми же основными характеристиками и отличаются только кривой выходной характеристики. Для используемого фтористого волокна выходная характеристика EDFA выглядит более ровной, как видно из рис. 7.9.

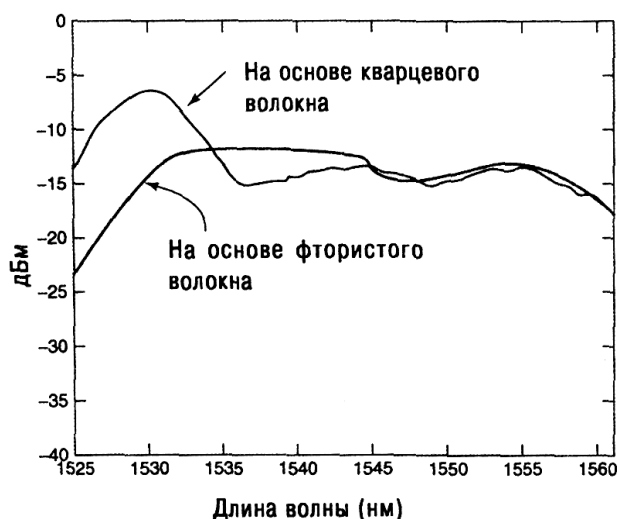


Рис. 7.9. Выходная характеристика усилителей EDFA на основе кварцевого волокна и фтористого волокна. (См. [7.4, 7.14])

Выходная характеристика особенно важна для многоканальных систем WDM. Обычные (на основе кварцевого волокна) усилители EDFA принудительно запитывались в тот или иной канал, чтобы иметь возможность создать примерно одинаковую амплитуду в каждом из них для WDM несущей. Один из путей создания таких условий состоял в сужении полосы усилителя за счет использования только длинноволновой части выходной характеристики (см. рис. 7.9). Это осуществлялось путем фильтрации полосы 1530-1542 нм.

Одним из следствий этого было использование более плотного частотного плана в системах WDM. Это, однако, вызвало увеличение чувствительности к некоторым типам нелинейности, таким как четырехволновое смешение, которое обсуждалось в гл. 6. Другой метод уплощения выходной характеристики состоит в селективном ослаблении, вводимом в каждый канал на входе усилителя для создания более плоской выходной характеристики. Это достаточно кропотливая операция.

Чтобы снизить (или устранить совсем) эту сложную операцию подстройки уровня каналов, производители внедрили в схемы сетевых элементов алгоритмы самооптимизации. Вид несбалансированной выходной характеристики для EDFA на основе кварцевого волокна, несущего сигнал в системе DWDM, приведен на рис. 7.10.

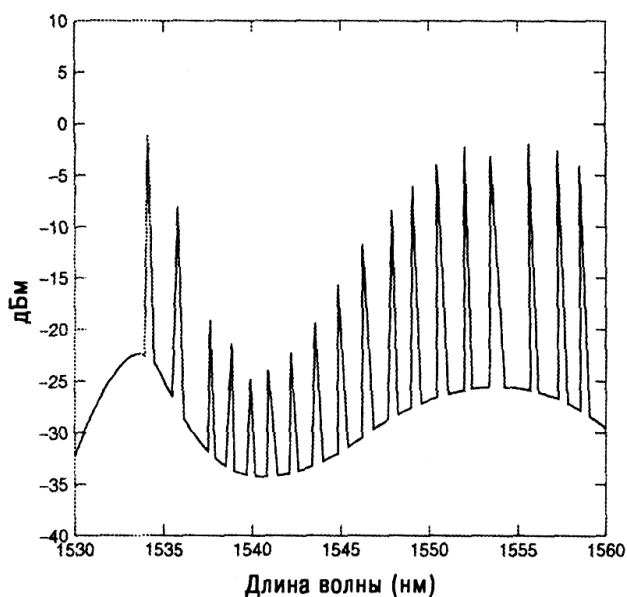


Рис. 7.10. Вид несбалансированной выходной характеристики для EDFA на основе кварцевого волокна, несущего групповой сигнал DWDM. (Получено с разрешения компании Corning, Inc., см. [7.12])

Основное преимущество усилителя EDFA на основе фтористого волокна в том, что его выходная характеристика в области длин волн около 1540 нм значительно ровнее, чем у EDFA на основе кварцевого волокна. Существует, однако, один недостаток использования EDFA на основе

фтористого волокна. Его коэффициент шума выше, так как он использует накачку 1480 нм, а не 980 нм, как это может EDFA на основе кварцевого волокна. Использование длины волны 980 нм для накачки при использовании фтористого волокна неэффективно ввиду поглощения возбужденного состояния. Но это та цена, которую нужно платить за возможность использования более плоской выходной характеристики, при которой можно использовать всю полосу пропускания такого типа усилителей [7.12].

7.3.1.4. Другие усилители на волокне, легированном редкоземельными элементами (РЗЭ)

Усилитель на кварцевом волокне легированном эрбием обеспечивает полосу около 35 нм в окне прозрачности 1550 нм. Существует полоса шириной примерно 200 нм, потери в которой не превышают 0,25 дБ/км. Если же допустить уровень потерь до величины 0,35 дБ/км, то можно рассчитывать на использование системами DWDM полосы шириной примерно 400 нм. Для использования такой широкой полосы требуются усилители с другими редкоземельными легирующими добавками. Одним из таких усилителей может быть *оптический усилитель на теллуритовом волокне, легированном эрбием (EDTFA)*, который способен расширить полосу усиления до 90 нм.

Полезную полосу пропускания в окне 1550 нм можно еще больше расширить, если использовать *оптические усилители на фтористом волокне, легированном тулием (TDFFA)* или *празеодимом (PDFFA)*. Используя тулиевый усилитель типа TDFFA можно получить полосу усилителя с 1470 до 1650 нм. Усилитель на волокне, легированном празеодимом, работает в окне прозрачности 1310 нм.

Экспериментируя с эрбиевым усилителем типа EDTFA, специалистам NTT Laboratories (Япония), путем использования специального эквалайзера, удалось создать усилитель с относительно плоской характеристикой в диапазоне 1561-1611 нм, реализующий ширину полосы 50 нм. Этот усили-

тель имел коэффициент усиления порядка 25 дБ и уровень шума меньше 6 дБ. На основе этого экспериментального образца компания NTT создала впоследствии усилитель типа EDTFA с плоской характеристикой в рабочем диапазоне 1570-1617 нм, см. [7.5], с. 56-64.

7.4. Критические рабочие параметры усилителей типа EDFA

7.4.1. Усиление и выходная характеристика

Как мы видели в разделе 7.3.1, выходная характеристика усилителя EDFA на основе кварцевого волокна изменяется в зависимости от длины волны в полосы усиления. То же можно сказать и про усиление такого усилителя. Усиление также зависит от мощности и состояния поляризации входного сигнала. Оно будет также меняться в зависимости от относительной входной мощности каждого канала WDM/DWDM. Следовательно, влияние временного распределения входной мощности, как правило в моменты ввода нового или вывода существующего каналов, должно как-то характеризоваться и управляться в рамках используемых многоканальных применений. Усиление ОУ типа EDFA может быть вычислено по заданной средней входной мощности P_{in} и средней выходной мощности P_{out} . Заметим, что в приведенном ниже выражении мощности даны по отношению к определенной длине волны рассматриваемого сигнала.

$$G_{dB} = 10 \log \left[\frac{\{P_{out}(\lambda_c) - P_{ase}(\lambda_c)\}}{P_{in}(\lambda_c)} \right] \quad (7.1)$$

где P_{ase} — уровень мощности усиленного спонтанного излучения.

Заметим, что составляющая мощности ASE вычитается при вычислении усиления G_{dB} в выражении (7.1).

Усиление оптического усилителя существенно зависит от уровня входного сигнала. Интересно заметить, что усилитель демонстрирует большое усиление для слабых входных сигналов. Например, усиление больше 30 дБ можно ожидать для входных сигналов меньше чем —20 дБм

[7.2]. Таким образом, нелинейность амплитудной характеристики — важный параметр для больших уровней сигнала.

Для того, чтобы охарактеризовать усиление EDFA, необходимо включить в тест определение малосигнального усиления, полосу на уровне -3 дБ и выходную мощность насыщения. Эти три параметра могут изменяться с длиной волны входного сигнала. Критическими являются следующие параметры усилителя EDFA, определенные ниже:

Профиль - термин, используемый для описания зависимости от длины волны той или иной характеристики. Усиление шума выражается в дБ по отношению к одной волне, а профиль усиления шума это усиление конкретного усилителя в зависимости от изменения длины волны.

Равномерность усиления — максимальная разность усиления в отдельных каналах на выходе усилителя при условии, что мощности сигнала на всех входах одинаковы.

Усиление сигнала — принципиальный показатель, который определяет рабочую точку усилителя. Усиление шума, с другой стороны, является усилением, относящимся к малому сигналу, который даже будучи усилен не влияет на рабочую точку, тогда как последующий большой сигнал приводит усилитель в насыщение.

Перекрестное насыщение усиления — изменение усиления конкретного канала, когда входной уровень другого канала (или нескольких каналов) изменяется на некоторую величину [7.2].

Таблица 7.2.

Сравнение рабочих характеристик EDFA на двух длинах волн: 1536 и 1550 нм

| Сравниваемые длины волн | 1535 - 1536 нм | 1550 - 1554 нм |
|-----------------------------|----------------|----------------|
| Усиление | 38-43 дБ | 38-41 дБ |
| Ширина рабочей полосы | 2нм | 4 нм |
| Коэффициент шума | 5,0 дБ | 4,25 дБ |
| Выходная мощность насыщения | + 15дБм | + 15,8дБм |

В табл. 7.2 приведено сравнение рабочих характеристик на двух длинах волн: 1536 и 1550 нм. Эта последняя длина волны соответствует длине волны смещенной нулевой дисперсии.

Замечание. Эта таблица отражает типичные характеристики усилителя EDFA компании INO

Источник. Компания INO, Quebec, Canada [7.13].

7.4.2. Усиленная спонтанная эмиссия (ASE)

Принципиальный источник шума в оптических усилителях — усиленная спонтанная эмиссия (ASE). Ее спектральная плотность близка к постоянной и похожа на белый или тепловой шум. Влияние спонтанной эмиссии заключается в добавлении флуктуации к мощности усиленного сигнала, которые преобразуются в текущие флуктуации в процессе фотодетектирования. Оказывается, что основной вклад в шум приемника происходит за счет биений составляющих спонтанной эмиссии с усиливаемым сигналом. Это явление биения похоже на гетеродинное детектирование в том, что спонтанно излучаемая радиация смешивается с усиленным сигналом в фотодетекторе и формирует гетеродинную составляющую фототока. Это биение спонтанной эмиссии с сигналом создает шумовой ток.

Коэффициент шума усилителя F_n связан с усилением усилителя G и коэффициентом спонтанной эмиссии n_{sp} следующим соотношением:

$$F_n = 2n_{sp}(G-1)/G \approx 2n_{sp} \quad (7.2)$$

где

$$n_{sp} = N_2/(N_2 - N_1) \quad (7.3)$$

а N_1 и N_2 - населенность атомов (в общем случае рабочих частиц) в релаксионном и возбужденном состояниях.

Рассмотрим выражение (7.2). Из этого выражения ясно, что отношение сигнал шум усиленного сигнала ухудшается на 3 дБ даже для идеального усилителя, у которого $n_{sp} = 1$. Для большинства существующих усилителей

коэффициент шума F_n должен превышать 3 дБ и может быть порядка 6-8 дБ [7.2].

Мощность ASE в сигнале, проходящим через усилитель, можно вычислить, используя следующее соотношение:

$$N_{out}(\lambda) = (N(\lambda) \times G) + ASE \quad (7.4)$$

При этом требуются два измерения: 1) уровня входного сигнала $N_{in}(\lambda)$ и 2) общего уровня шума выходного сигнала $N_{out}(\lambda)$.

В состоянии насыщения, или для нелинейной амплитудной характеристики, вклад ASE мал. Следовательно, можно сказать, что усиление G не что иное, как отношение выходной мощности к входной мощности, когда ASE не принимается во внимание [7.2].

Существует пять источников шума, которые вносят вклад в отношение сигнал/шум в ВОСП, использующих усилители EDFA, а именно:

- дробовой шум;
- шум биения составляющих спонтанного излучения;
- шум биения сигнала с составляющими спонтанного излучения;
- интерференционный шум (взаимное влияние);
- избыточный шум

Большинство из нас уже знакомо с такими источниками шума, как дробовой шум, который характерен для световой эмиссии. Дробовой шум порождается случайными флуктуациями времени прихода фотонов, которые генерируют световой сигнал. Словарь терминов IEEE, см. [7.6], определяет *дробовой шум*, как «шум, вызванный флуктуациями тока, вследствие дискретной природы носителей заряда и случайным или непредсказуемым (или и тем и другим) поведением заряженных частиц, излучаемых эмиттером».

Шум биения составляющих спонтанного излучения (называемый также — шум биений ASE-ASE). Это шум, нарабатанный в результате взаимодействия между составляющими ASE внутри полосы амплитудно-модулированного сигнала. При возрастании усиления волоконного усилителя, шум ASE уменьшается с ростом выходной мощности, или тогда,

когда наступает состояние насыщения. Следовательно, для волоконных усилителей, используемых в качестве усилителей мощности, этот тип шума можно игнорировать. Этот шум может быть очень важным при использовании низких уровней сигналов, что имеет место в предусилителях, если в них не используются узкополосные фильтры.

Шум биения сигнала с составляющими спонтанного излучения генерируется тогда, когда полезный сигнал смешивается (гетеродинируется) с белым шумом ASE. Этот шум не может быть удален оптически или электрически путем фильтрации, так как он лежит в полосе частот модулированной информационной несущей. Однако, его нужно измерять. Этот коэффициент шума усилителей EDFA обычно определяется в терминах «эффект шума биения сигнала с составляющими спонтанного излучения».

7.5. Рамановские усилители

В работе [7.10] указано, что «рамановское усиление возникает тогда, когда фотоны накачки высокой энергии (коротких длин волн) рассеивают колебательные моды матричной решетки материала (оптические фононы) и когерентно добавляют их к сигнальным фотонам низкой энергии (больших длин волн)». При практической реализации этот процесс носит название *передача с помощью эффекта Романа (D-RAT)*; свет накачки вводится в волоконный линейный усилитель со стороны, противоположной вводу сигнала. В этой конфигурации рамановский усилитель работает как малошумящий предусилитель. Основное преимущество низкоуровневого рамановского усиления в том, что он не вносит дополнительных нелинейностей в волокно.

На рис. 7.11 схематически показан распределенный рамановский усилитель. Как указано в работе [7.11]: «Сигналы двух ортогонально поляризованных диодов лазерной накачки мультиплексируются по признаку

поляризации (П-мультиплексирование) и объединяются в WDM для создания противонаправленной накачки в передающем волокне. В результате распространяющийся в прямом направлении сигнал получает рамановское усиление в волокне. Использование противонаправленной накачки уменьшает влияние шума накачки на сигнал.»

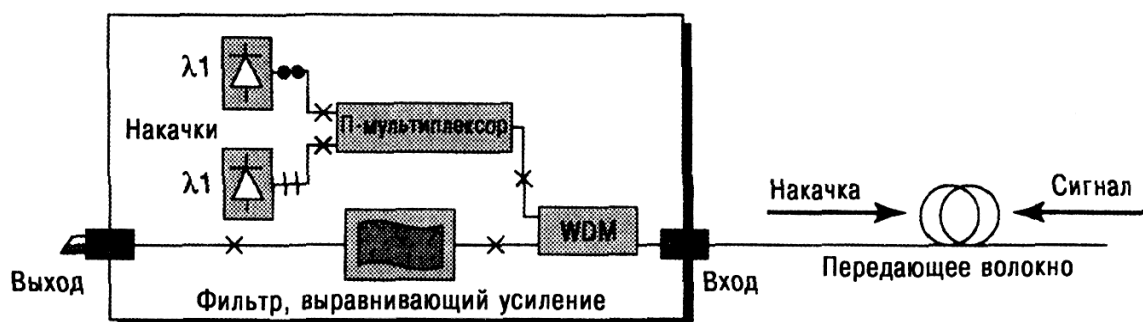


Рис. 7.11. Блок-схема распределенного рамановского усилителя (С разрешения компании Corning, Inc., [7.15])

Выходная характеристика распределенного рамановского усилителя зависит от свойств передающего волокна, таких как поглощение сигнала накачки, эффективная площадь и рамановский коэффициент усиления. В одном из практических примеров, приведенном в [7.11], усиление составило всего лишь 3,75 дБ.

Неравномерность усиления является одним из важных параметров для ВОУ, в частности тогда, когда используются системы WDM/DWDM. В случае рамановского усилителя, усиление для конкретного сигнала зависит от разности частот сигнала и накачки. На рис. 7.12 показано малосигнальное рамановское усиление в волокне большой длины. Произведение коэффициента усиления на ширину полосы более 20 ТГц, с пиком усиления в районе 13,2 ТГц. Различные сигналы получают различное усиление, зависящее от разности их частоты и частоты накачки. Следовательно, любой из диапазонов длин волн будет иметь некоторое колебание уровня усиления. Для уровня накачки 200 мВт, показанного на рис. 7.12, получается максимальное усиление 7,78 дБ с колебаниями уровня (максимальный -

минимальный) в 3,5 дБ. Фактическое колебание уровня усиления, определяемое как (колебание усиления в дБ)/(максимальное усиление в дБ) = $3,5/7,78 = 0,45$ в полосе С, показанной на рис. 7.12.

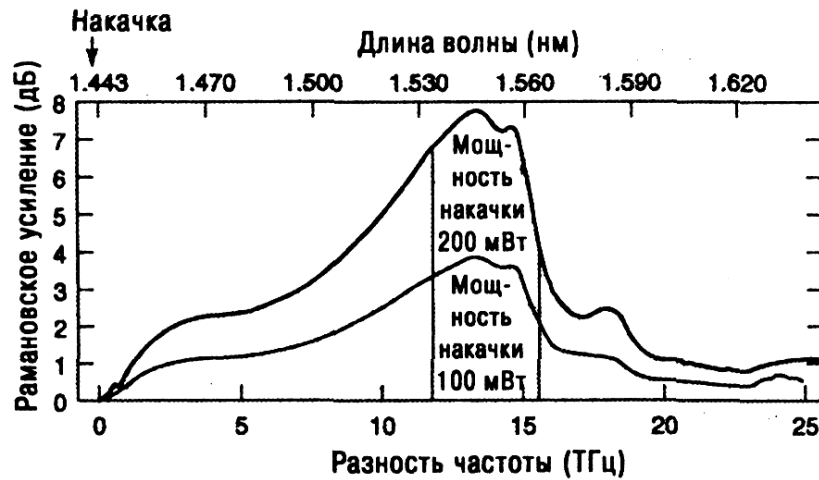


Рис. 7.12. Спектр рамановского усиления в волокне большой длины с накачкой 1443 нм при уровнях мощности накачки 100 и 200 мВт. На рисунке указан С диапазон длиной 30 нм (1530-1560 нм), см. [7.10, 7.11, 7.15].

При проектировании ВОСП оптоволоконный пролет переносит сформированный (многоволновой) сигнал WDM; комбинация распределенного рамановского усилителя и усилителя EDFA в тандемном соединении дает прекрасные результаты и позволяет уменьшить нарастание ASE.

На рис. 7.13 показан оптический спектр системы DWDM с 32 длинами волн, где отмечено отношение сигнал/шум (OSNR) для волокна длиной 125 км для двух случаев: 1) гибридный предусилитель с каскадом рамановского усиления + EDFA, 2) используется только EDFA. Из рисунка видно, что гибридная схема дает на 4,2 дБ большее отношение сигнал/шум.

Улучшение отношения сигнал/шум после прохождения пролета длиной 125 км с волокном LEAF

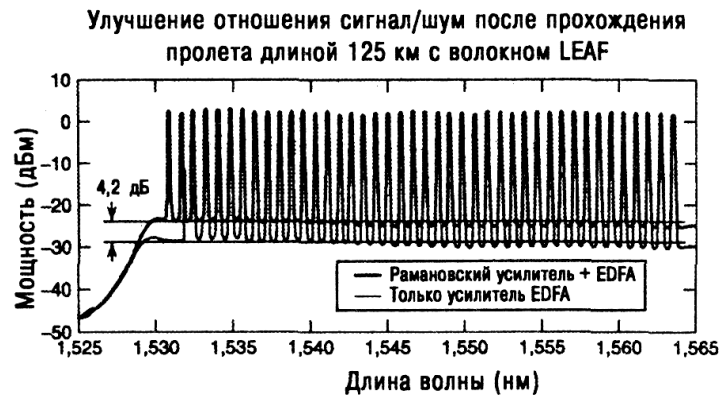


Рис. 7.13. Оптический спектр системы DWDM с 32 длинами волн, проходящих через волокно, они усиливаются либо гибридным предусилителем с каскадом рамановского усиления и EDFA, либо только EDFA. Максимальное усиление одинаково, тогда как пороговый пьедестал у гибридной схемы на 4,2 дБ ниже. (С разрешения компании Corning, Inc., [7.10, 7.11])

ГЛАВА 8 МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ

8.1. Возрастание требований на пропускную способность ВОСП

В работе [8.1] приведена оценка роста требований на емкость/скорость передачи, показывающая, что емкость ВОСП возрастает в 4 раза каждые 18 месяцев. Из всех средств, имеющихся в нашем распоряжении, только оптоволокно удовлетворяет этим потребностям роста. Существует два пути удовлетворить этим требованиям:

1. Установить новый кабель с большим числом волокон или использовать имеющиеся темные волокна.

2. Применить технологию *мультиплексирования с разделением по длине волны* на уже имеющемся волокне или на новом проложенном волокне. Практически при каждом таком рассмотрении преимущество будет на стороне выбора технологии WDM, учитывая стоимость прокладки нового кабеля, особенно для длинных кабельных систем. Цель данной главы - познакомить читателя с WDM и возможностью ее применения.

На ранней стадии применения ВОСП каждая работающая жила оптоволокна передавала один поток бит (практически каждая ВОСП содержит темные волокна, некоторые владельцы ВОК сдают их в аренду). Техника ВОСП развивалась так, что сначала осваивался диапазон несущей 1310 нм, а потом - 1550 нм. Следовательно, битовый поток передавался на некоторой длине волны этого диапазона волн. С возрастанием требований на емкость систем передачи развивалась и технология передачи в этом диапазоне волн. Когда стали осваивать диапазон длин волн 1550 нм, то следующий (второй) битовый поток был помещен в этом диапазоне. Следовательно, мы имели грубый, но эффективный вариант раннего WDM, а именно двухканальную систему. Концепция этой системы показана на рис. 8.1.

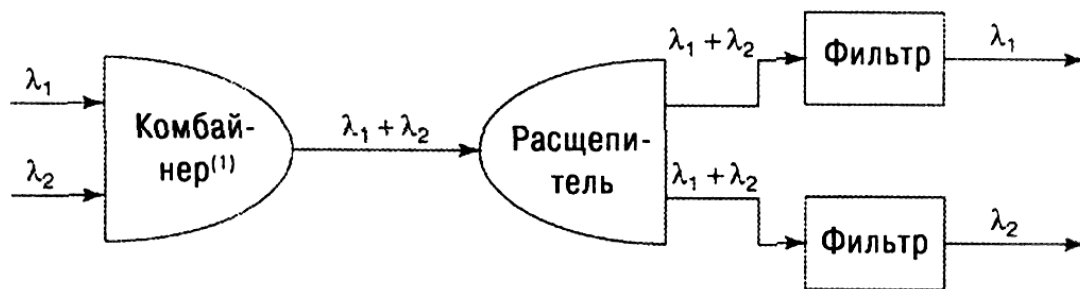


Рис. 8.1. Концептуальная блок-схема двухволновой системы WDM. На начальном этапе эти две волны соответствовали: $\lambda_1 = 1310$ нм и $\lambda_2 = 1550$ нм.

На рис. 8.1 разветвитель играет роль оптического комбайнера. Для простоты разветвитель (из комбайнера) мог бы быть пассивным сплиттером при использовании, например, биконического сплавного с отводами разветвителя (рассмотренного в разд. 3.5) в обратном направлении (замене входов на выходы). Сплиттер, приведенный на правой стороне рис. 8.1, мог бы быть тем же самым устройством, использованном в обратном направлении. Оба порта этого сплиттера содержат сигналы λ_1 и λ_2 .

В отечественной литературе термин Coupler традиционно переводят как *разветвитель*, полагая что его основная функция — разветвлять поток, тогда как в англоязычной литературе для этой цели используют по большей части Splitter, а за термином Coupler оставляют роль *объединителя*, или *комбайнера*.

Фильтры, на основе технологии тонких пленок, блокируют передачу энергии нежелательного спектра сигнала и позволяют пропустить энергию желаемого спектра сигнала. Технология тонких пленок рассматривается в разд. 8.6. Важность использования фильтров в операциях WDM трудно переоценить. Именно поэтому мы посвятили технологии фильтров три четверти главы.

8.2. Основы WDM-систем

Пара мультиплексор-демультиплексор является основой для системы WDM. Как показано на рис. 8.1, мультиплексор может быть просто комбайнером - устройством объединения нескольких несущих длин волн. Демультиплексор - напротив, выполняя обратную операцию, может быть совсем другим. Он должен выделять отдельные длины волн из агрегированного потока. Следовательно, демультиплексор требует использования механизма селекции длин волн. Эти механизмы делятся на две широкие категории: *демультиплексоры на основе дифракции* и *демультиплексоры на основе интерференции*.

Демультиплексоры на основе дифракции используют элементы с угловой дисперсией, такие как дифракционные решетки, которые пространственно диспергируют падающий луч на различные составляющие длины волн. Принцип действия такой решетки показан на рис. 8.2. Демультиплексор на основе интерференции использует свойства таких устройств, как направленные разветвители и оптические фильтры. Благодаря присущим им свойствам взаимности оптических волн в диэлектрической среде, эти устройства могут быть использованы как мультиплексоры и Демультиплексоры в зависимости от направления распространения.

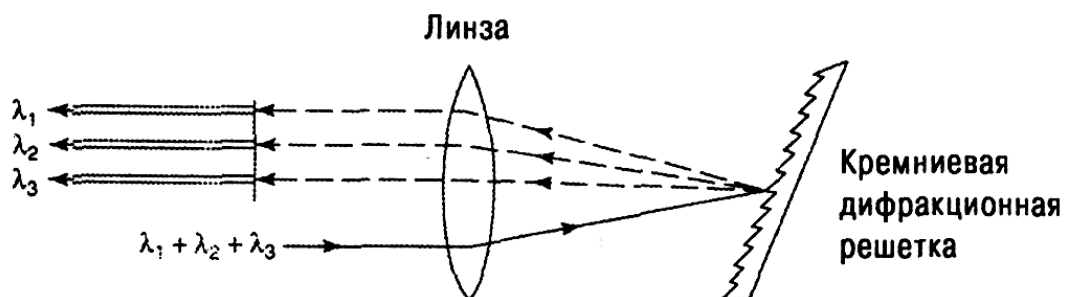


Рис. 8.2. Принцип действия дифракционной решетки с угловой дисперсией и фокусирующей линзой, используемой в качестве демультиплексора.

Необходимым элементом систем WDM является оптический усилитель типа EDFA. Достаточно высокий (20-25 дБ) коэффициент усиления усили-

теля EDFA позволяет компенсировать потери, вносимые пассивными элементами мультиплексора и демультимплексора, включая многие из устройств, описанных ниже. Если допустить, что мультиплексор и демультимплексор могут (каждый) вносить потери порядка 6 дБ, то мы уже имеем потери порядка 12 дБ. При увеличении числа каналов WDM потери начинают значительно расти. Потери расщепителя на разделение двух каналов равны 3 дБ, четырех каналов — 6 дБ и т. д. Вторичным эффектом этого является то, что мы привязаны к полосе 1530 — 1565 нм — рабочей полосе усилителей EDFA. Организация ITU-T разработала для этой полосы стандартизованную сетку частот с шагом между каналами 200/100/50 ГГц и возможностью его снижения до 25 ГГц. Сетка ITU-T формируется на основе уравнения:

$$F = 193,1 \pm m \times 0,1 \text{ (ТГц)} \quad (8.1)$$

где 193,1 ТГц - опорная частота, а m — целое число, см. разд. 8.9.

Даже будучи ограничены полосой 1530-1565 нм, можно ожидать к 2004 году размещения в системе DWDM 160 каналов, каждый из которых передает 40 Гбит/с.

8.3. Интерферометр Фабри-Перо

Интерферометр Фабри—Перо (Ф—П) является устройством интерференционного типа, основанным на многократном отражении светового луча от двух поверхностей тонких пластин. Его принцип действия показан на рис. 8.3. Существует интерференционный максимум для каждой длины волны, который математически выражается так:

$$m\lambda = 2d \cos \alpha \quad (8.2)$$

где m — целое число, а d — расстояние между пластинами.

Интерферометр использует многократные отражения между двумя близко расположенными частично посеребренными поверхностями. Часть

света проходит, а часть отражается каждый раз, когда свет достигает второй поверхности, образуя в результате много смещенных лучей, которые могут интерферировать друг с другом. Большое количество интерферирующих лучей создает интерферометр с исключительно высоким разрешением. Это чем-то напоминает множество щелей (шлицев) дифракционной решетки, которое увеличивает ее разрешение.

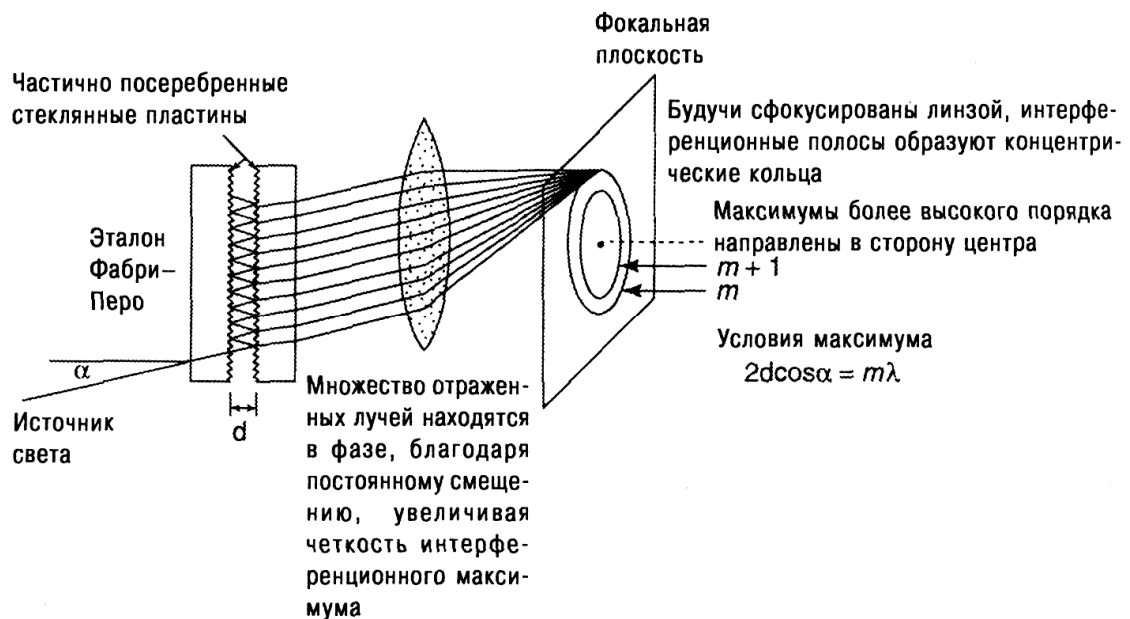


Рис. 8.3. Принцип действия интерферометра Фабри-Перо (см. [8.2])

Резонатор Фабри-Перо - устройство, полученное из интерферометра Ф-П. Он представляет собой две параллельные пластины, отражающие свет вперед и назад. *Степень дисперсности* (тонкость структуры линий) является показателем того, как много волновых каналов могут одновременно пройти без серьезной интерференции между ними. Она является мерой энергии волн внутри резонансной полости относительно энергии, потерянной за цикл. Чем больше степень дисперсности, тем уже ширина резонансной линии. Степень дисперсности может рассматриваться как эквивалент понятия добротности Q электрических фильтров.

На основе интерферометра Ф—П можно создать прекрасный оптический фильтр. Настройка фильтра осуществляется путем изменения

длины зазора между двумя зеркалами. При более сложной конструкции интерферометра Ф—П, вся структура целиком помещается в пьезоэлектрическую камеру так, что указанная длина зазора может быть изменена электрически для настройки и выбора определенного канала. Преимущества *фильтров Фабри—Перо* в том, что они могут быть интегрированы в систему без возникновения потерь на стыковку. Число каналов ограничивается 50-100, учитывая ограниченную степень дисперсности практического фильтра Ф—П ($F = 100$ для 97% зеркала в тандеме, что увеличивает эффективную степень дисперсности до $F \sim 1000$). На рис. 8.4. приведена схема конструкции практического фильтра Ф—П [8.3].

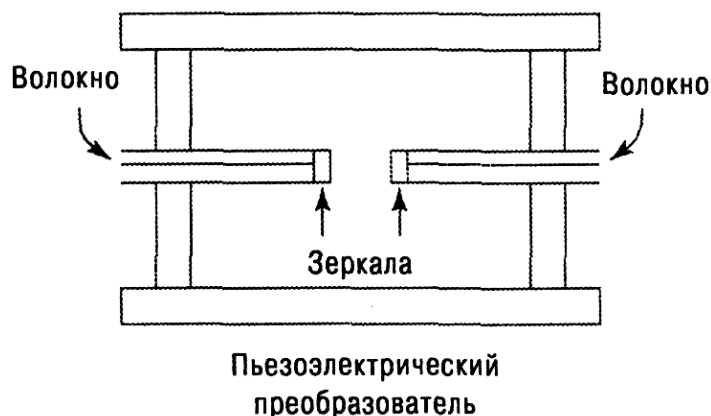


Рис. 8.4. Схема конструкции практического фильтра Ф-П

8.4. Фильтры Маха-Цендера

Интерферометр Маха—Цендера (М—Ц) можно сделать путем соединения двух выходных портов 3-дБ разветвителя к двум входным портам другого 3-дБ разветвителя, как показано на рис. 8.5. Первый разветвитель расщепляет оптический сигнал на два равных потока, где каждый поток приобретает различные фазы (когда длины ветвей разветвителя оказываются различны) до того, как во втором разветвителе произойдет интерференция одного

расщепленного сигнала с другим).

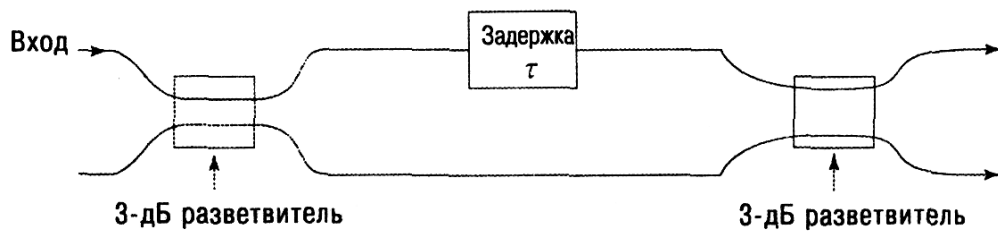


Рис. 8.5. Оптический интерферометр Маха—Цендера

Относительная фаза зависит от длины волны и коэффициента пропускания $T(\nu)$, который тоже зависит от длины волны. Он может быть вычислен по формуле:

$$T(\nu) = \cos^2(\pi\nu\tau_m) \quad (8.3)$$

где τ_m — относительная задержка между двумя ветвями интерферометра М—Ц, а ν — частота. Цепочка каскадов таких интерферометров М—Ц с определенным образом настроенными задержками работает как оптический фильтр, который может быть настроен путем небольшой подстройки длин ветвей.

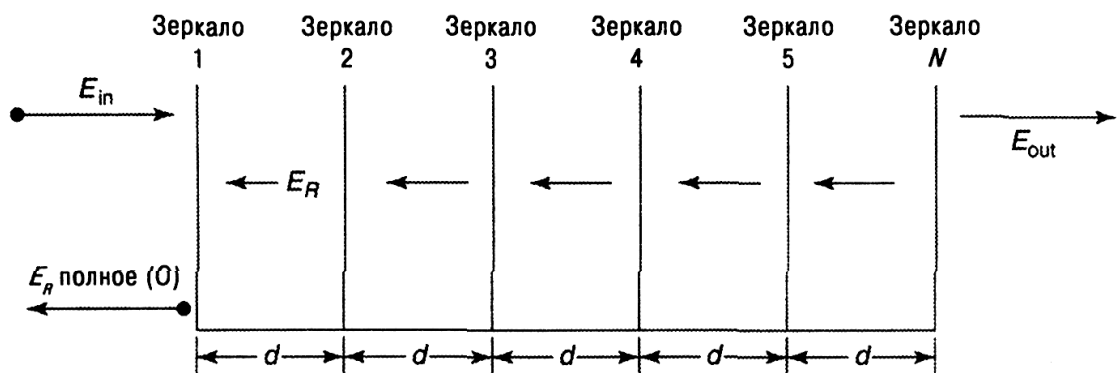
В работе [8.3] сообщается, что общие методы, используемые для расчета относительной задержки τ_m , реализуются так, что каждый М—Ц каскад последовательно блокирует альтернативные каналы. Эта схема требует, чтобы $\tau_m = (2^m \Delta\nu_{ch})^{-1}$, для шага между каналами, равного $\Delta\nu_{ch}$. Результирующий коэффициент передачи 10-каскадного фильтра имеет такую же избирательность, какая эквивалентна избирательности фильтра Ф-П, имеющего степень дисперсности 1600. Эта каскадная схема способна выделять близко стоящие каналы. Каскадное включение интерферометров М-Ц дает проектировщику систем WDM еще одну заслуживающую внимания технологию [8.2].

8.5. Решетки Брэгга и волоконно-оптические решетки Брэгга (FBG)

На рис. 8.6 приведена модель, которую мы будем использовать для описания принципа работы *дифракционной решетки Брэгга*. Решетка Брэгга является последовательностью полупрозрачных параллельных пластин. Эти пластины отделены одна от другой на расстояние d . Свет, состоящий из нескольких или большого числа длин волн, входит с левой стороны. В зависимости от расстояния d будет наблюдаться отражение одной или нескольких длин волн. Этот отраженный свет выходит также с левой стороны, тогда как остальная группа длин волн света выйдет с правой стороны. Условия точного отражения длин волн, или *условия Брэгга* таковы:

$$d = -n\lambda_B / 2 \quad (8.4)$$

где n — произвольное число, а λ_B — длина волны отраженного канала; d — представляет собой шаг, или *период брэгговской решетки*, который должен быть целым кратным половины длины волны. Отрицательный знак означает отражение, а n — означает порядок решетки Брэгга. Когда $n = 1$ (первый порядок), имеем $d = \lambda_B / 2$, а при $n = 2$ (второй порядок), имеем $d = \lambda_B$. Решетка Брэгга дает возможность получить прекрасный полосовой фильтр.



(1) Первый световой импульс у зеркала 1 = E_{in}

(2) Отраженная часть = E_R

(3) $\lambda_B = -\frac{2n}{d}$ (знак минус означает отражение)

Рис. 8.6. Модель дифракционной решетки Брэгга (основана на концепции, приведенной в [8.2, 8.3])

Волоконная решетка Брэгга (FBG) состоит из отрезка оптического волокна, показатель преломления которого периодически изменяется по длине волокна. Эти изменения показателя преломления моделируют структуру решетки Брэгга. Общий метод изготовления FBG состоит в том, что волокно подвергается интенсивному ультрафиолетовому облучению через шаблон, который имеет период, равный периоду решетки, подлежащей изготовлению. Когда германий-силикатная сердцевина волокна экспонируется интенсивным светом, прошедшим через шаблон, в ней формируются структурные дефекты и, следовательно, возникают постоянные изменения показателя преломления. Они имеют ту же периодичность, что и облучаемый ультрафиолетом шаблон.

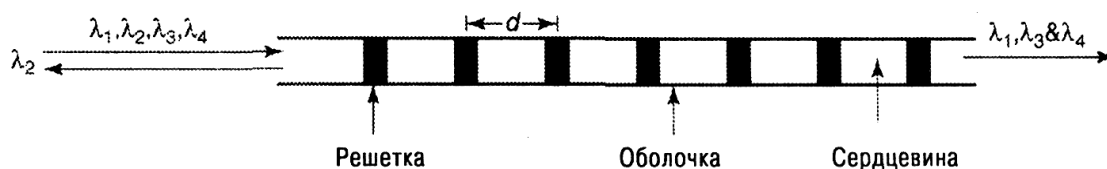


Рис. 8.7. Иллюстративная модель волоконной решетки Брэгга. Для окна 1550 нм, d может быть в диапазоне от 1 до 10 мкм.

На рис. 8.7 схематично показана структура волоконной решетки Брэгга. Для наглядности и лучшей иллюстрации композиции и структуры, размеры волокна и период решетки были намеренно увеличены.

Другой метод формирования отражательной решетки Брэгга основан на многослойной (стековой) диэлектрической структуре, составленной из слоев толщиной $\lambda/4$. Она известна как *фотонная решетка*, каждая с различным коэффициентом преломления. Такие решетки отражают длины волн для всех возможных углов падения, причем они не поглощают энергию падающего луча, как это делают отражатели на зеркалах [83].

FBG широко используются вместе с оптическими циркуляторами, обычно в оптических мультиплексорах ввода-вывода (OADM), где FBG обратно отражает только те длины волн, для которых она была

спроектирована. Остальная часть агрегатного потока длин волн может после этого быть передана другой комбинации циркулятору-FBG, для того, чтобы выделить другую длину волны, и т. д. Этот принцип показан на рис. 8.8. FBG могут быть использованы как полосовые фильтры, интерференционные фильтры, компенсаторы хроматической дисперсии, а также для выравнивания выходной характеристики усилителей EDFA.

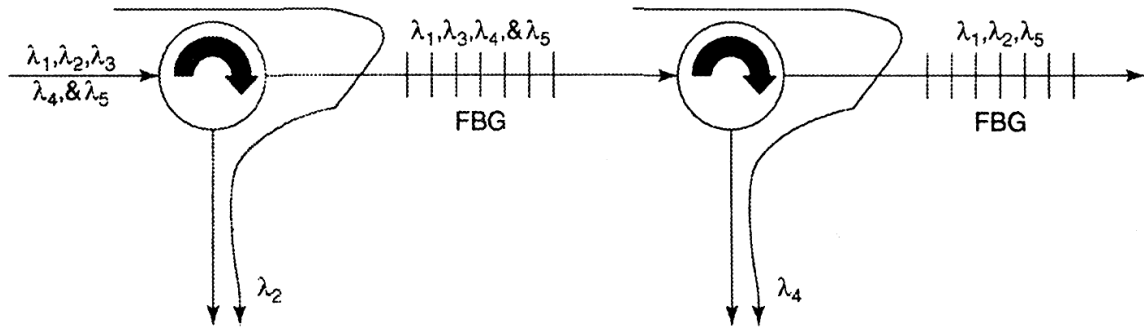


Рис. 8.8. Комбинация: циркулятор-решетка FBG выделяет канал с одной несущей из агрегатного канала, за которым следует аналогичная комбинация, выделяющая другой канал. FBG - волоконная решетка Брэгга

FBG чувствительны к изменению температуры, независимо от периодичности или ширины полосы. Их обычно размещают в специальных термостатах.

В табл. 8.1 приведены типовые параметры и характеристики промышленно выпускаемых FBG. В конфигурациях DWDM предметом особой заботы является перекрестная помеха. На рис. 8.9 приведена типичная характеристика полосового фильтра демультиплексора. При шаге в 50 ГГц помеха от соседнего канала подавляется примерно на 30 дБ.

Спецификация полосового фильтра на волоконной решетке Брэгга

| | Тип А (100 ГГц) | Тип А (50 ГГц) | Тип В | Тип С |
|--|--|--|---|--|
| Применение | фильтр WDM | фильтр WDM | внешний резонатор | подавление ASE |
| Диапазон длин волн | 1530-1560 нм | 1530-1560 нм | полоса 980 нм полоса 1310 нм полоса 1480 нм полоса 1550 нм | 1525-1545 нм |
| Точность длины волны | ± 0,05 нм | ± 0,05 нм | ± 0,05 нм | ± 0,05 нм |
| Отражательная способность | ≥ 99% | ≥ 99% | от 1 до 99% | |
| Оптическая ширина полосы | 0,6 нм, FWHM | 0,3 нм, FWHM | 0,6 нм, FWHM | ≥10дБ |
| Подавление перекрестной помехи при передаче | ≥ 30 дБ | ≥ 30 дБ ≥ 20 дБ ^{а)} | ≥ 30 дБ | ≥ 30 дБ |
| Подавление перекрестной помехи при отражении | ≥ 30 дБ | ≥ 30 дБ ≥ 20 дБ ^{а)} | ≥ 30 дБ | ≥ 30 дБ |
| Упаковка | (1)покрытый УФ акрилатом, (2)стеклянный корпус, (3) с температурной компенсацией | (1)покрытый УФ акрилатом, (2) стеклянный корпус, (3)с температурной компенсацией | (1)покрытый УФ акрилатом, (2)стеклянный корпус, (3)с температурной компенсацией | (1)покрытый УФ акрилатом, (2) стеклянный корпус, (3)с температурной компенсацией |

^{а)} от соседнего канала

Источник. С разрешения компании Sumitomo Electric Lightwave Corp.,

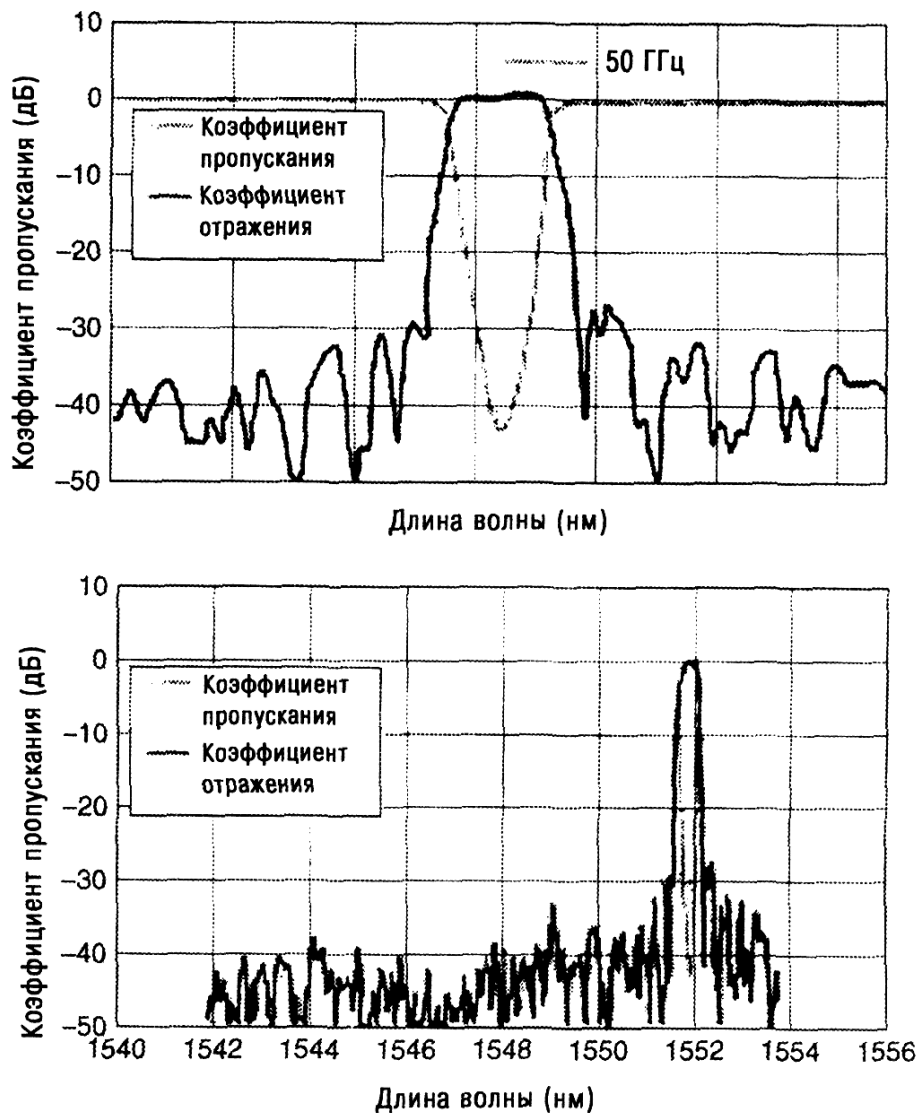


Рис. 8.9. Характеристики полосового фильтра на дифракционной решетке Брэгга. (С разрешения компании Sumitomo Electric Lightwave Corp., [8.4])

8.5.1. Некоторые характерные применения FBG

8.5.1.1. Уникальные фильтрующие свойства FBG

Существует ряд приложений, где используются свойства оптической фильтрации FBG, позволяющие выделять определенные длины волн. В простейшей форме оптическая дифракционная решетка работает как рефракционный фильтр, центральная длина волны которого может управляться путем изменения периода решетки, а полоса пропускания может подстраиваться путем изменения удельной плотности полос решетки и небольшой частотной модуляцией периода решетки.

Еще одним применением FBG является стабилизирующий фильтр. Усилитель EDFA сделал возможным практическую реализацию систем WDM. Различные устройства, использованные для мультиплексирования и демупльтиплексирования световой волны, являются пассивными и имеют потери, даже большие потери (например, такие как 20 дБ на устройство). Усилители EDFA компенсируют эти потери. Более того, они могут осуществить компенсацию всего агрегатного потока каналов WDM, тогда как регенератор должен был бы осуществлять эту работу поканально.

Предположим, что мы имеем агрегатный поток, сформированный из 32 каналов. Для его регенерации с помощью одного регенератора последовательно, нам пришлось бы долго ждать; если делать это параллельно, то пришлось бы использовать 32 регенератора. Хорошая новость в нашем случае состоит в том, что с этой работой справится один усилитель EDFA. Плохая - в том, что мы хотели бы получить на выходе один и тот же (в пределах разумного) уровень для каждого из 32 каналов.

На показатели усилителя EDFA оказывают влияние характеристики лазерных диодов накачки. На характеристики лазера накачки часто оказывают влияние нежелательные внешние отражения, направленные обратно в резонаторную полость лазера, а также флуктуации температуры и тока инжекции. Введение фильтра стабилизатора накачки на основе FBG, решило эту проблему путем запираия излучения волн длиной 980 и 1480 нм у лазеров накачки и обеспечения невосприимчивости к скачкам спектральной моды, вызванным изменениями температуры, тока возбуждения и оптической обратной связи. Ключевой характеристикой фильтра стабилизатора накачки на основе FBG является его полоса пропускания и отражательная способность по отношению к характеристикам лазеров накачки и данному конкретному приложению.

8.5.1.2. Фильтры выравнивания волновой характеристики

Фильтр выравнивания волновой характеристики - еще одно

применение FBG. Учитывая, что усиление EDFA имеет тенденцию изменяться на выходе в спектральной полосе 1530-1560 нм, необходимо выровнять усиление в пределах этого спектрального окна путем использования фильтров выравнивания на основе FBG. Из трех основных спектральных окон, эти фильтры позволяют уменьшить вариации усиления в окне, где используются EDFA, улучшая, таким образом, характеристику и упрощая конструкцию систем WDM.

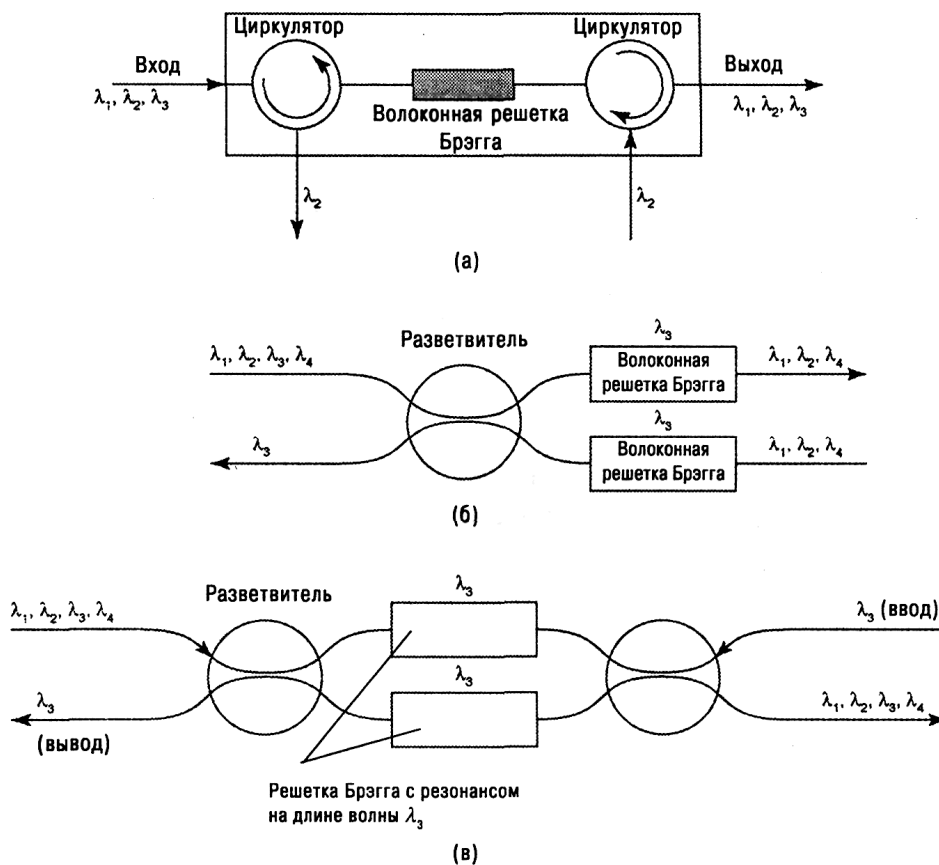


Рис. 8.10. Применение фильтров DWDM на основе волоконных решеток Брэгга, (а) интерферометр Майкельсона, (б) интерферометр Мах-Цендера, (в) конфигурация, допускающая ввод-вывод оптической несущей.

(См. Lightwave [8.10], рис. 2, стр. 191)

8.5.1.3. Использование FBG для компенсации хроматической дисперсии

Хроматическая дисперсия является одной из двух главных причин ухудшения передачи света на гигабитных скоростях. Она уже обсуждалась

нами в разделе 6.3. Общий подход, используемый для компенсации этого типа искажений, состоит в том, чтобы пропустить световой сигнал через устройство, дающее такой же уровень искажений, но противоположного знака, компенсируя, тем самым, накопленную хроматическую дисперсию. Компенсация может осуществляться как в каком-то одном канале, так и во всей полосе DWDM, используя, например, очень длинную дифракционную чирп-решетку.

На рис. 8.10 приведены фильтры DWDM, основанные на волоконных решетках Брэгга, в конфигурациях оптических мультиплексоров ввода-вывода.

8.6. Фильтры на тонких пленках

Тонкопленочные фильтры используют многослойные покрытия диэлектрических фильтров. Когда многоволновой сигнал падает на поверхность фильтра, то каждый слой фильтра вынуждает различные длины волн падающего сигнала отразиться или пройти через него, в зависимости от длины волны и конструкции фильтра. Каждая длина волны, таким образом, вносит конструктивный или деструктивный вклад в проходящий сигнал. Соответствующие длины волн такого сигнала или исчезали, или сохранялись, проходя до самого выхода [8.1]. Такие фильтры, обычно, имеют большое число слоев, так, что их характеристиками пропускания можно достаточно жестко управлять. Это позволяет передавать (пропускать) относительно узкую полосу длин волн, или, даже, одну длину волны.

Потери при прохождении через разветвитель 1×2 составляют примерно 4 дБ, из которых 3 дБ являются потерями от деления мощности пополам. Разница в 1 дБ соответствует вносимым потерям самого устройства. Когда число выходных портов растет, соответственно этому растут и потери на разветвление. Так разветвитель 1×16 имеет потери между входным и вы-

ходным портами равные 14,5 дБ. Эти потери могут быть аппроксимированы следующей формулой:

$$\text{Потери [дБ]} = 0,5 + 3,5 \log_2 N, \quad (8.5)$$

где N — число выходных портов [8.1].

Такой подход мог бы быть использован для расчета входных каналов перед детектированием в приемнике. Следовательно, бюджет линии связи должен быть приспособлен к таким потерям. Одним из путей компенсировать потери может быть использование усилителя EDFA на агрегатном сигнале непосредственно перед демультиплексированием.

Тонкопленочная технология плохо приспособлена для систем с плотной упаковкой каналов (например, для шага между несущими 50 ГГц). Однако, тонкопленочные фильтры обеспечивают достаточно узкую полосу пропускания для использования с мультиплексорами-демультиплексорами систем WDM, имеющих 16-32 канала. При большей плотности каналов в системах используются другие технологии.

8.6.1. Оптические фильтры — подведение итогов

Оптические фильтры, обычно, достаточно малы. Их можно встраивать в оптические разъемы, адаптеры и даже в оптическое волокно. Некоторые типичные значения характеристик такого встроенного фильтра, работающего в полосе 1550-1625 нм, приведены ниже:

- вносимые потери: < 1,0 — 1,5 дБ;
- коэффициент изоляции длин волн: ≥ 35 дБ;
- возвратные потери: 40 дБ
- рабочая температура: -20°C — +70°C.

8.7. Дифракционная решетка на массиве волноводов

Дифракционная решетка на массиве волноводов (AWG) является интегрированным подходом к проблеме демультиплексирования. Решетка состоит из фазированного массива оптических волноводов, работающих собственно как дифракционная решетка.

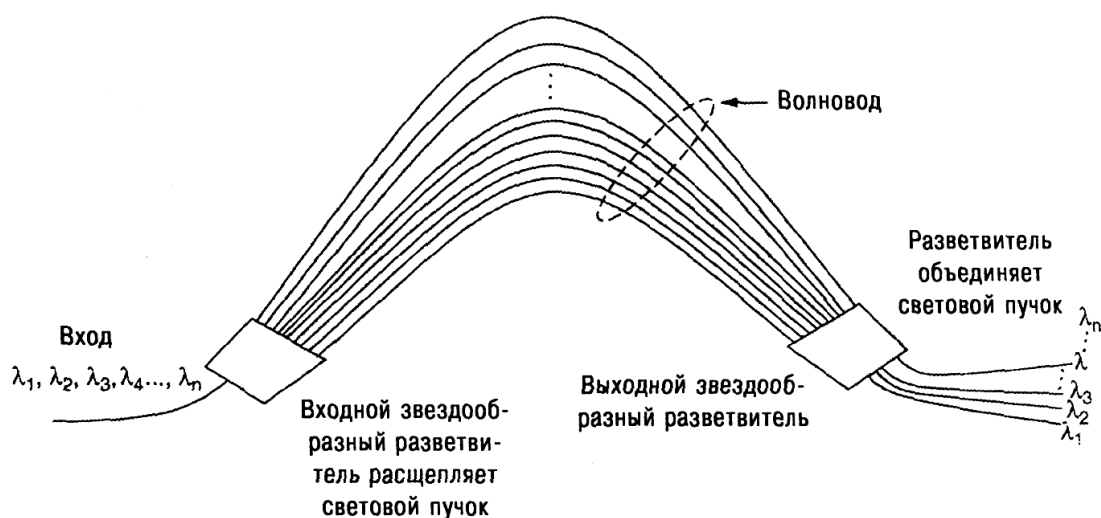


Рис. 8.11. Принципиальная схема маршрутизатора на волноводной решетке.

Этот тип решетки можно изготовить, используя технологию InGaAsP/InP, позволяющую интегрировать такие типы направляющих волноводов с передатчиком или приемником WDM. Иллюстрацией AWG является рис. 8.11. Как показано на рисунке, входящий WDM сигнал разветвляется в массив планарных волноводов, после прохождения через секцию (звездообразного) разветвителя. При прохождении волны в каждом отдельном волноводе, она имеет на выходе определенный и отличный от других фазовый сдвиг, ввиду различной длины отдельных волноводов. Учитывая частотную зависимость постоянной распространения моды, фазовый сдвиг оказывается зависимым от длины волны. В результате, различные каналы фокусируются на различные пространственные пятна, когда выход волноводов дифрагирует через другую секцию разветвителя. Как можно видеть, AWG работает как обычная дифракционная решетка (для

более подробного знакомства с принципом работы AWG см. работу [А-21], гл. И, разд. 11.1.6.3). Его эффективность при надлежащем проектировании может достигать 100%. Используя эту технологию, можно изготовить ряд элементов системы WDM, например, маршрутизатор на волноводной решетке.

На рис. 8.12 показано типичное применение AWG, используемого в качестве оптического мультиплексора ввода-вывода.

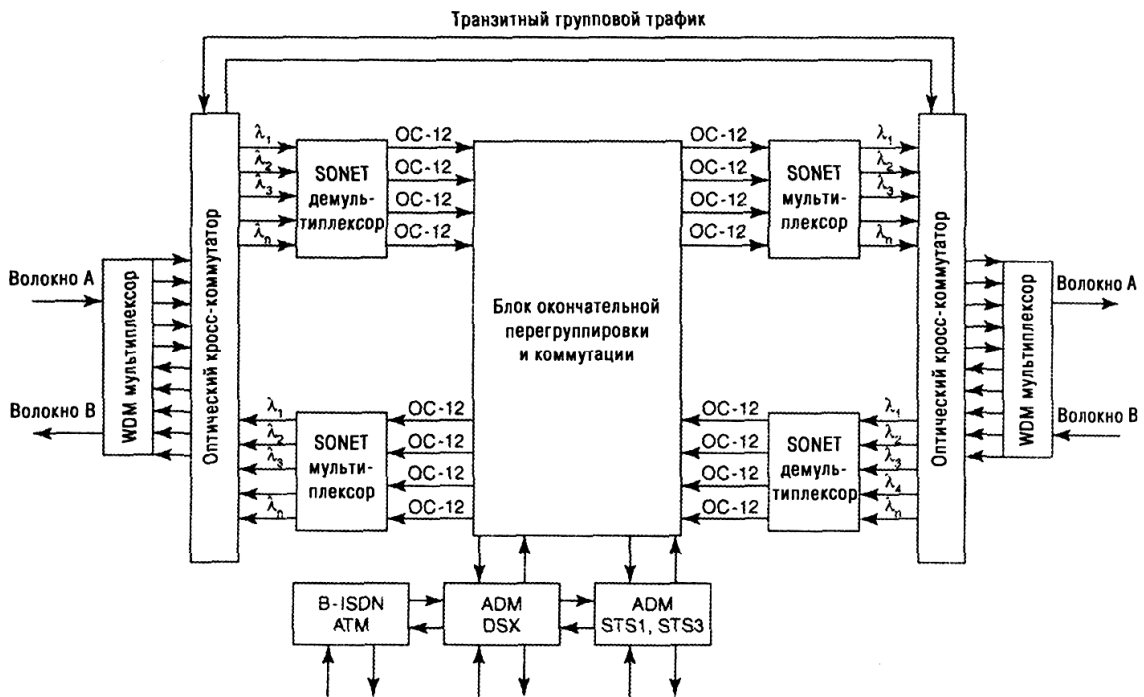


Рис. 8.12. Типичная архитектура передачи, использующая мультиплексор-демультиплексор и конфигурацию ввода-вывода.

8.8. Прямая и обратная операции интерливинга

Устройство интерливинга разделяет каналы, которые подлежат мультиплексированию, на группы: нечетные и четные для конфигурации интерливинга 1×2 . В этом простейшем случае устройство интерливинга объединяет два набора каналов в один плотно упакованный набор, имеющий шаг упаковки в два раза меньше исходного. В противоположность этому,

устройство деинтерливинга разделяет единый входной набор каналов и направляет разделенные потоки в два выходных потока, имеющих удвоенный шаг между каналами по сравнению с исходным. Устройства интерливинга можно каскадировать, формируя двоичное дерево. Например, устройство деинтерливинга с конфигурацией 1×4, берет набор каналов DWDM с шагом 50 ГГц, разделяет и направляет их по 4 выходным волокнам с шагом между каналами 200 ГГц. Устройства интерливинга позволяют достичь такого шага между каналами, какого мы не смогли бы достичь другими путями. Эта основная концепция иллюстрируется рис. 8.13.

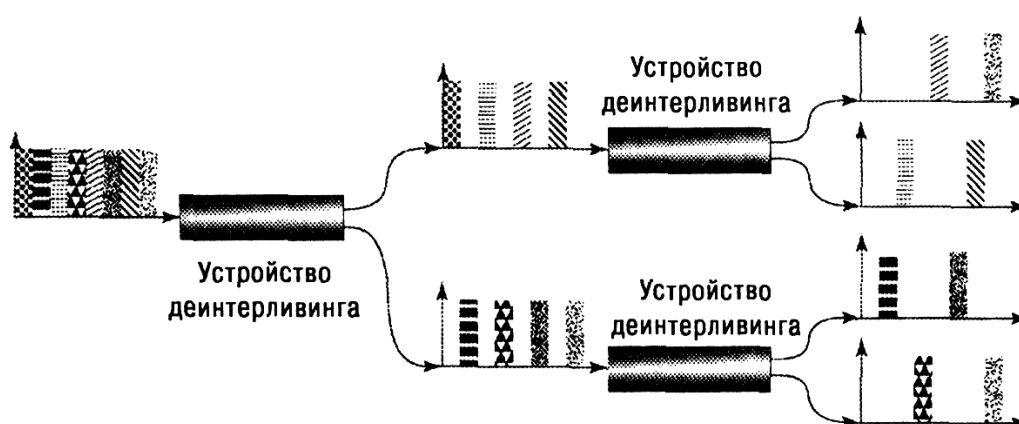


Рис. 8.13. Иллюстрация основной концепции деинтерливинга. В нашем случае устройство деинтерливинга разделяет входной спектр периодически упакованных длин волн на два дополнительных множества, имеющих в два раза больший шаг между каналами. Эта концепция может быть использована повторно для создания еще большего шага между каналами и увеличения модульности процесса проектирования. (С разрешения Bob Shrine, компании Wavesplitters Technology, Fremont, CA).

Общий принцип, положенный в основу операций интерливинга, - интерферометрическое перекрытие двух оптических лучей. Интерференция создает периодически повторяющуюся выходную картину, так как различные целократные длины волн проходят через устройство интерливинга. Желаемый шаг между каналами устанавливается путем управления интерференционной картиной. Существует несколько подходов для достижения

указанной интерференционной картины: используя сплавные волоконные интерферометры, жидкие кристаллы, двулучепреломляющие кристаллы и др. В работе [8.9] описана одна из простейших конструкций в плане используемых материалов и технологий, которой является сплавной волоконный интерферометр Маха-Цендера. В этой конструкции интерференция создается путем использования волокна с неодинаковой длиной пути между двумя 3-дБ разветвителями. Путем тщательной настройки разницы в длине пути, можно установить желаемую (и удовлетворяющую сетке частотного плана ITU-T) величину шага между каналами (см. разд. 8.9). Благодаря тому, что конструктивным материалом является волокно, этот подход к созданию интерливинга приводит к очень низким потерям, равномерной характеристике на протяжении широкого диапазона длин волн, низкой дисперсии и минимальным эффектам, зависящим от поляризации.

Жидкие и двулучепреломляющие кристаллы используют различные состояния поляризации (т.е. наличие обыкновенного и необыкновенного лучей), создающие разницу эффективной длины путей для этих состояний поляризации. Обыкновенный и необыкновенный лучи, проходящие через такой кристалл, испытывают различную степень преломления и, следовательно, приобретают различную разность хода. Когда определенная входная длина волны приобретает между различными состояниями поляризации разность хода кратную целому числу полных длин волн, то эта длина волны (сигнал) передается через выходной поляризатор, тогда как другая длина волны будет направлена на другой выход. Нужно понимать, что входной сигнал не должен иметь какую-то определенную поляризацию, поэтому должны быть включены дополнительные элементы для достижения желаемых характеристик при любом случайном состоянии поляризации. В любом случае выходная картина этих типов устройств демонстрирует синус-квадратную форму волны.

Часто можно отличить устройства интерливинга/деинтерливинга различных пользователей по форме синус-квадратной интерферометрической

картины. Характеристика одного из таких устройств показана на рис. 8.14.

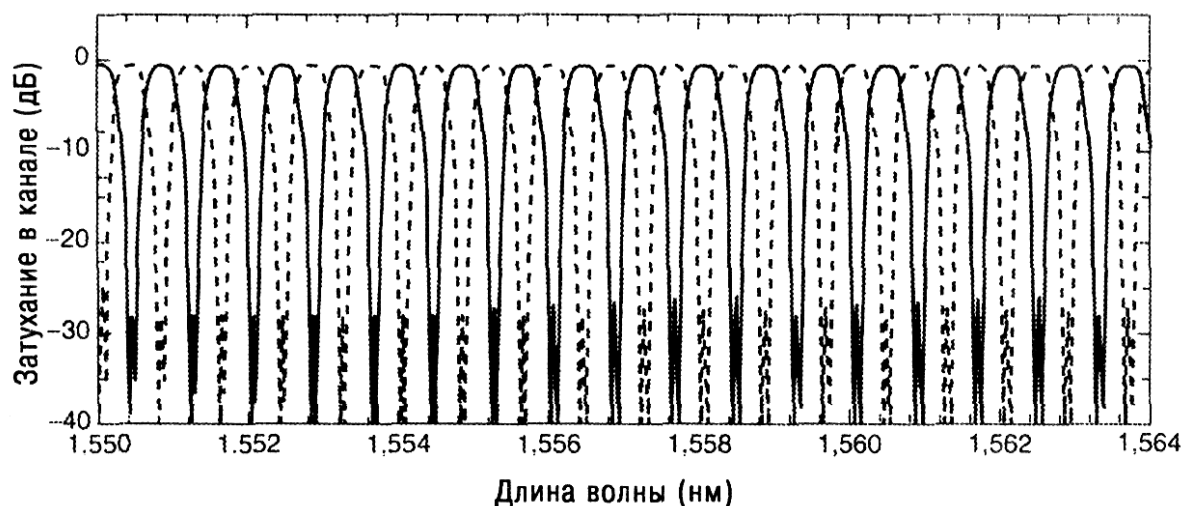


Рис. 8.14. Спектр, показывающий выход двух рукавов устройства деинтерли-винга. Этот пример показывает некоторые ключевые параметры оптической волны на выходе устройства деинтерливинга. Среди этих параметров: низкие вносимые потери, плоская амплитудно-волновая характеристика в рабочей полосе, низкий уровень перекрестных помех, однородность коэффициентов передачи в каналах. (С разрешения Bob Shrine, компания Wavesplitters Technology, Fremont, CA [8.9])

Устройства интерливинга/деинтерливинга — это полностью волоконно-оптический продукт, который демонстрирует низкие вносимые потери, типично 0,6 дБ для мультиплексора и 1,6 дБ для демультиплексора. Амплитудно-волновая характеристика такого устройства приведена на рис. 8.14. Здесь вносимые потери 0,6 дБ достигаются даже тогда, когда полоса пропускания на уровне 0,5 дБ покрывает > 50% канального пространства. Кроме того, перекрестные помехи поддерживаются на уровне < 25 дБ, допуская некоторый дрейф (сдвиг) сигнальных несущих длин волн.

Значения характерных параметров типовой пары устройств интерливинга/деинтерливинга приведены в табл. 8.2.

Значения параметров для высококачественных устройств
интерливинга/деинтерливинга

| Параметры | Мультиплексор | Демультиплексор |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Шаг между каналами | 50 ГГц | 50 ГГц |
| Вносимые потери | < 0,6 дБ (< 0,4 дБ - типовое) | < 1,6 дБ (< 0,8 дБ - типовое) |
| Неравномерность АВХ | < 0,2 дБ | < 0,4 дБ |
| Ширина полосы на уровне 0,5 дБ | > ±11 ГГц | > ±10 ГГц |
| Ширина полосы на уровне 3,0 дБ | > ±20 ГГц | > ±17,5 ГГц |
| Перекрестные помехи | > 12 дБ (при ±10 ГГц) | > 22 дБ (при ±10 ГГц) |
| Дисперсия | < 10 пс/нм (при ±10 ГГц) | < 10 пс/нм (при ±10 ГГц) |
| PDL | < 0,1 дБ | < 0,1 дБ |

Источник. С разрешения Bob Shrine, компания Wavesplitteis Technology, Fremont, CA [8.9].

**8.9. Рекомендации ITU-T (МСЭ) по назначению длин волн,
используемых в системах WDM**

В табл. 8.3 приведены номинальные центральные частоты и эквивалентные им длины волн для шага сетки несущих 50 и 100 ГГц. Эта таблица известна как *сетка ITU-T* или *частотный план ITU-T*. В соответствующей публикации ITU-T G.692 Annex A (см. [8.6]), добавлено следующее замечание: для преобразования частоты в длину волны и наоборот, скорость света, c , принимается равной $2,99792458 \times 10^8$ м/с.

Таблица 8.3

Номинальные центральные частоты для шага 50 ГГц

| Номинальные центральные частоты (ГГц) | Номинальные центральные частоты (ГГц) для шага 100 ГГц и выше | Номинальные центральные длины волн (нм) |
|---------------------------------------|---|---|
| 196,10 | 196,10 | 1538,77 |
| 196,05 | - | 1529,16 |
| 196,00 | 196,00 | 1529,55 |
| 195,95 | - | 1529,94 |
| 195,90 | 195,90 | 1530,33 |
| 195,85 | - | 1530,72 |
| 195,80 | 195,80 | 1531,12 |
| 195,75 | - | 1531,51 |
| 195,70 | 195,70 | 1531,90 |
| 195,65 | - | 1532,29 |
| 195,60 | 195,60 | 1532,68 |
| 195,55 | - | 1533,07 |
| 195,50 | 195,50 | 1533,47 |
| 195,45 | - | 1533,86 |
| 195,40 | 195,40 | 1534,25 |
| 195,35 | - | 153464 |
| 195,30 | 195,30 | 1535,04 |
| 195,25 | - | 1535,43 |
| 195,20 | 195,20 | 1535,82 |
| 195,15 | - | 1536,22 |
| 195,10 | 195,10 | 1536,61 |
| 195,05 | - | 1537,00 |
| 195,00 | 195,00 | 1537,40 |
| 194,95 | - | 1537,79 |
| 194,90 | 194,90 | 1538,19 |
| 194,85 | - | 1538,58 |
| 194,80 | 194,80 | 1538,98 |
| 194,75 | - | 1539,37 |
| 194,70 | 194,70 | 1539,77 |
| 194,65 | - | 1540,16 |
| 194,60 | 194,60 | 1540,56 |
| 194,55 | - | 1540,95 |
| 194,50 | 194,50 | 1541,35 |
| 194,45 | - | 1541,75 |
| 194,40 | 194,40 | 1542,14 |
| 194,35 | - | 1542,54 |
| 194,30 | 194,30 | 1542,94 |
| 194,25 | - | 1543,33 |
| 194,20 | 194,20 | 1543,73 |
| 194,15 | - | 1544,13 |
| 194,10 | 194,10 | 1544,53 |
| 194,05 | - | 1544,92 |
| 194,00 | 194,00 | 1545,32 |
| 193,95 | - | 1545,72 |
| 193,90 | 193,90 | 1546,12 |
| 193,85 | - | 1546,52 |
| 193,80 | 193,80 | 1546,92 |
| 193,75 | - | 1547,32 |
| 193,70 | 193,70 | 1547,72 |
| 193,65 | - | 1548,11 |
| 193,60 | 193,60 | 1548,51 |

Продолжение таблица 8.3

| Номинальные центральные частоты (ТГц) | Номинальные центральные частоты (ТГц) для шага 100 ГГц и выше | Номинальные центральные длины волн (нм) |
|---------------------------------------|---|---|
| 193,55 | - | 1548,91 |
| 193,50 | 193,50 | 1549,32 |
| 193,05 | - | 1552,93 |
| 193,00 | 193,00 | 1553,33 |
| 192,95 | - | 1553,73 |
| 192,90 | 192,90 | 1554,13 |
| 192,85 | - | 1554,54 |
| 192,80 | 192,80 | 1554,94 |
| 192,75 | - | 1555,34 |
| 192,70 | 192,70 | 1555,75 |
| 192,65 | - | 1556,15 |
| 192,60 | 192,60 | 1556,55 |
| 192,55 | - | 1556,96 |
| 192,50 | 192,50 | 1557,36 |
| 192,45 | - | 1557,77 |
| 192,40 | 192,40 | 1558,17 |
| 192,35 | - | 1558,58 |
| 192,30 | 192,30 | 1558,98 |
| 192,25 | - | 1559,39 |
| 192,20 | 192,20 | 1559,79 |
| 192,15 | - | 1560,20 |
| 192,10 | 192,10 | 1560,61 |

Замечание. Конечные точки этой таблицы приведены только для иллюстрации. При последующей эволюции многоканальных систем предполагается включить частоты, расширяющие указанные пределы.

Источник. Таблица A.1/G.692, ITU-T Rec. G.692, [8.6].

8.9.1. Выбор минимального шага и стандартных несущих частотного плана систем WDM

Опорной частотой сетки ITU-T является 193,10 ТГц. Эта частота не выбиралась, исходя из какой-либо известной линии атомного стандарта абсолютных частот AFR.

Минимальный шаг был первоначально выбран 100 ГГц, а затем он был уменьшен до 50 ГГц. Этот минимум обеспечивает гибкость в выполнении различных требований стандарта ITU-T G.692. Кратные минимальному шагу значения совместимы с емкостью и шириной спектра усилителя EDFA.

Технологические ограничения, главным образом со стороны фильтров и допусков на источники света, были приняты во внимание при выборе ми-

нимального шага между каналами. Этот подход позволил использовать эту технологию наилучшим образом, не налагая ограничения, специфичные для тех или иных приложений. Перспективные оценки технологии показывают, что (в ближайшем будущем) может быть достигнута только часть того, на что рассчитан стандарт ITU-T G.692.

Частота 193,10 ТГц (стандарта абсолютных частот AFR) обеспечивает оптический сигнал необходимой точностью и стабильностью на том уровне, который может быть обеспечен идеальным национальным/международным стандартом частоты. Для этого могут быть предложены стандарты, основанные на (атомных источниках) He-Ne, стабилизированных парами йода, или He-Ne, стабилизированных метаном.

AFR могут использоваться для следующих приложений.

- калибровки тестового оборудования WDM;
- обеспечения эталона частоты при производстве и калибровке устройств WDM;
- обеспечения эталона частоты для многоканальных систем;
- управления и/или обслуживания оптических источников частоты.

Замечание. Национальные/международные источники AFR пока не имеют стандартизованных значений точности и стабильности. Эти значения находятся в стадии изучения в соответствующих технических комитетах ITU-T.

Источник: Раздел 8.9.1. был основан на приложении Appendix II, ITU-T Rec. G.692 [8.6].

8.10. Типичные характеристики систем WDM

В табл. 8.4 приведены характеристики мультиплексоров компании ADC, а табл. 8.5 - характеристики демультиплексоров компании ADC. В табл. 8.6 приведены типовые характеристики мультиплексоров

/демультиплексоров компании ADC. А на рис. 8.15 показана АВХ для 16-канальной конфигурации DWDM оборудования ADC.

Таблица 8.4

Спецификация мультиплексора DWDM компании ADC.

| | Число каналов | | | |
|---|---------------|-----|-----|-----|
| | 4 | 8 | 15 | 32 |
| Шаг между каналами, ГГц | 200 | 100 | 100 | 100 |
| Ширина полосы на уровне 1 дБ (минимум), нм | 0,7 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Ширина полосы на уровне 3 дБ (минимум), нм | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Максимальные вносимые потери ¹⁾ , дБ | 1,5 | 2,3 | 3,3 | 5,3 |

¹⁾ Вносимые потери не включают потери оптических разъемов.

Источник. С разрешения компании ADC, [8.8].

Таблица 8.5

Спецификация демультиплексора DWDM компании ADC.

| | Число каналов | | | |
|---|---------------|-----|-----|-----|
| | 4 | 8 | 15 | 32 |
| Шаг между каналами, ГГц | 200 | 100 | 100 | 100 |
| Ширина полосы на уровне 1 дБ (минимум), нм | 0,7 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Ширина полосы на уровне 3 дБ (минимум), нм | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Ширина полосы на уровне 20 дБ (максимум), нм | 1,5 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Максимальные вносимые потери ¹⁾ , дБ | 2,0 | 2,8 | 3,8 | 5,8 |
| Минимальная изоляция длин волн (несущих) ²⁾ , дБ | 30 | 30 | 30 | 30 |

¹⁾ Вносимые потери не включают потери оптических разъемов.

²⁾ Под изоляцией понимается отношение оптической мощности рассматриваемого канала к сумме оптических мощностей блокируемых каналов, выраженная в дБ.

Источник. С разрешения компании ADC, [8.8].

Общая спецификация мультиплексора/демультиплексора компании ADC.

| | |
|--|--------------------|
| Максимальная неравномерность внутри полосы | $\pm 0,1$ дБ |
| Точность центральной длины волны | $\pm 0,5$ нм |
| Максимальные температурные изменения длины волны | $\pm 0,0012$ нм/°C |
| Максимальная неоднородность | 1,0 дБ |
| Максимальные возвратные потери | -45 дБ |
| Максимальные потери, зависящие от поляризации | 0,2 дБ |
| Рабочая температура | -5°C до 55°C |
| Тип волокна | Corning SMF28 |

Источник. С разрешения компании ADC, [8.8].

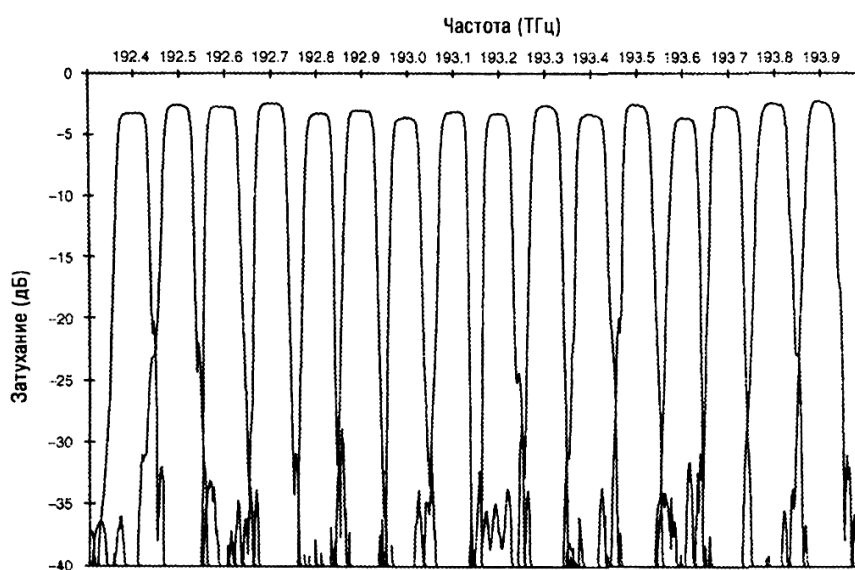


Рис. 8.15. Характеристика 16-канального демультиплексора компании ADC (с разрешения компании ADC, [8.8]).

ГЛАВА 9 СИНХРОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ SONET И СИНХРОННАЯ ЦИФРОВАЯ ИЕРАРХИЯ SDH

9.1. Введение

SONET и SDH являются похожими цифровыми транспортными форматами, которые были разработаны с целью обеспечения надежной и гибкой цифровой структуры, способной использовать возможности увеличения емкости и скорости передачи, предоставляемые оптическим волокном. SONET — сокращение, расшифровываемое как *синхронная оптическая сеть*. В аналогичной манере, SDH — расшифровывается, как *синхронная цифровая иерархия*. Можно сказать, что SONET имеет североамериканские особенности, а SDH - европейские. Возможно об этом можно говорить с некоторой натяжкой, так как обе системы очень похожи.

Исходная концепция разработки цифрового формата для высокоскоростных оптических систем состояла в том, чтобы иметь всего лишь один единый стандарт для общемировых применений. Но этого не получилось. США хотели в качестве основной использовать скорость порядка 50 Мбит/с, позволяющую инкапсулировать DS3 (или скорость T3 = 44,736 Мбит/с - максимальную стандартную скорость американской иерархии PDH). Европейцы не имели (стандартных) скоростей, близких к этой, и в качестве начальной скорости иерархии использовали скорость около 150 Мбит/с (чтобы иметь возможность инкапсулировать скорость E4 = 139,264 Мбит/с - максимальную стандартную скорость европейской иерархии PDH). Другое различие касается структуры фреймов. США ориентировались на фрейм, состоящий из 13 строк и 180 байт-столбцов для скорости 150 Мбит/с, отражающей то, что сейчас называют структурой синхронного транспортного сигнала — STS-3. Европа поддерживала структуру фрейма STS-3, состоящую из 9 строк и 270 столбцов, для того,

чтобы эффективно передавать сигнал E1 (2,048 Мбайт/с), используя фрейм: 9 строк на 4 байт-столбца, основанный на 32-байтной структуре фрейма E1 с периодом 125 мкс.

Комитет ANSI T1X1 одобрил окончательный стандарт в августе 1988, вместе со стандартом CCITT, тем самым был установлен глобальный стандарт SONET/SDH. Этот стандарт был основан на 9-строчном фрейме, в рамках которого SONET стал подмножеством SDH [9.1].

Как SONET, так и SDH, используют технику базовых строительных блоков. Как мы упомянули выше, SONET начал с меньшей скорости 51,84 Мбит/с. Эта базовая скорость называется STS-1 (*синхронный транспортный сигнал 1-го уровня*). Полезные нагрузки, имеющие меньшие скорости, отображаются на формат STS-1, тогда как сигналы более высоких скоростей получают по схеме байт-интерливинга, N выровненных фреймов STS-1 позволяют создать сигнал STS- N . Результат такой простой схемы мультиплексирования дает возможность обойтись без дополнительных заголовков; следствие этого в том, что скорость передачи сигнала STS- N в точности равна $N \times 51,84$ Мбит/с, где N в настоящее время определена для значений 1, 3, 12, 24, 48 и 192 (дополнительно используются значения 96 и 786) [9.2].

Основным строительным блоком SDH является синхронный транспортный модуль уровня 1 (STM-1), имеющий скорость 155,52 Мбит/с. Полезная нагрузка с меньшей скоростью отображается на поле полезной нагрузки STM-1, а сигналы более высоких скоростей генерируются путем синхронного мультиплексирования N сигналов STM-1, для формирования сигналов STM- N . Транспортный заголовок сигнала STM- N в N раз больше транспортного заголовка STM-1, а скорость передачи составляет $N \times 155,52$ Мбит/с. В настоящее время только STM-1, STM-4, STM-16 и STM-64 определены в стандартах ITU-T (STM-256 находится в стадии стандартизации) [9.5].

Как в SONET, так и в SDH, скорость передачи фреймов составляет 8000 фреймов/с, что соответствует периоду повторения фреймов 125 мкс.

Существует высокая степень совместимости между SONET и SDH. Ввиду различия в размере основных строительных блоков: 51,84 Мбит/с для SONET и 155,52 Мбит/с для SDH, они отличаются по структуре. Однако, если мы умножим скорость SONET на три, формируя тем самым сигнал STS-3, мы фактически получим начальную скорость SDH — 155,52 Мбит/с. На рис. 9.1 и 9.2 приведены схемы мультиплексирования SONET и SDH. В табл. 9.1 приведены сравнительные значения скоростей в стандартах SONET и SDH.

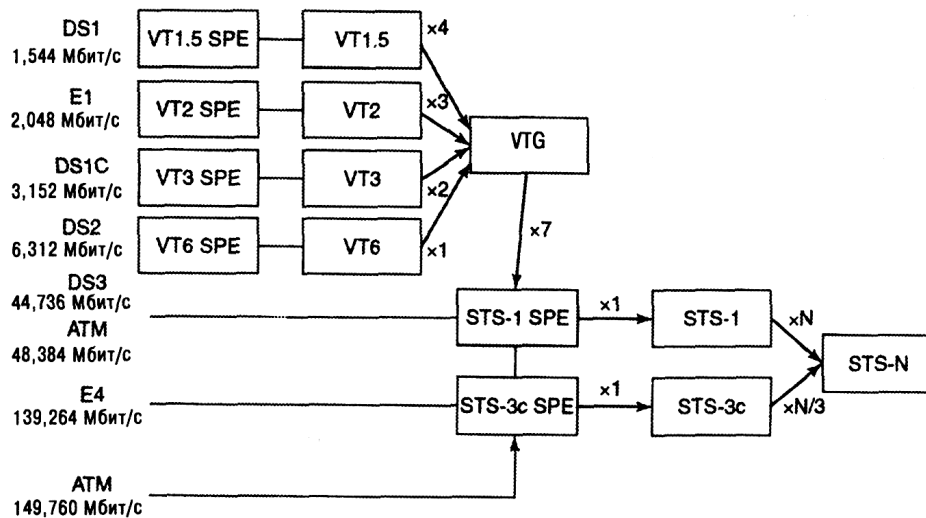


Рис. 9.1. Структура мультиплексирования SONET. (См. стандарт ANSI [9.1], рис.3, с.4.)

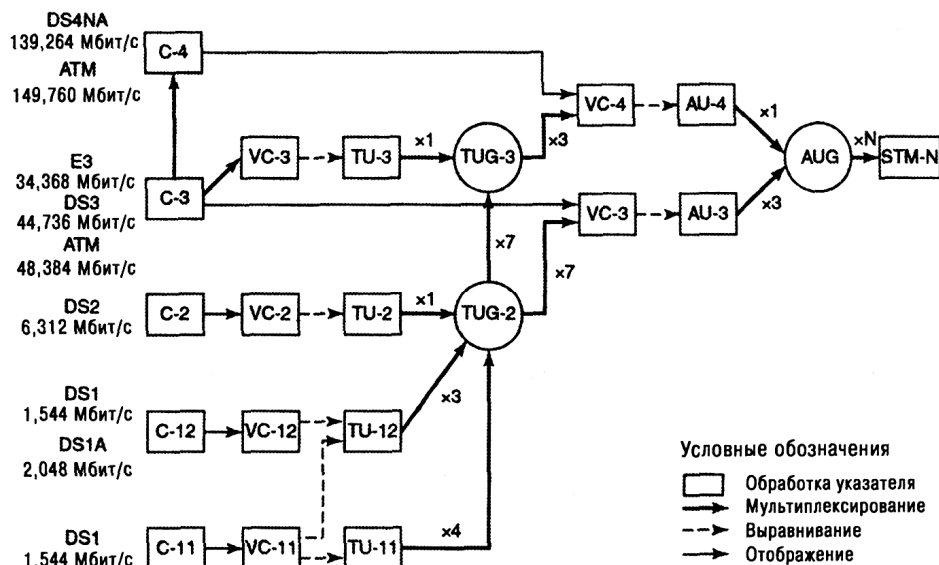


Рис. 9.2. Структура мультиплексирования SDH. (См. источник [9.3], рис.4, с.4.)

Скорости передачи SONET и SDH

| Оптическая несущая SONET уровня OC-N | Электрический SONET уровня STS-N | Эквивалентный модуль SDH STM-N | Линейная скорость, Мбит/с |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| OC-1 | STS-1 | - | 51,84 |
| OC-3 | STS-3 | STM-1 | 155,52 |
| OC-12 | STS-12 | STM-4 | 622,08 |
| OC-24 | STS-24 | - | 1244,16 |
| OC-48 | STS-48 | STM-16 | 2488,32 |
| OC-192 | STS-192 | STM-64 | 9953,28 |
| OC-768 | STS-768 | STM-256 | 39813,12 ¹⁾ |

¹⁾ Начальное тестирование этих систем относится к моменту написания книги (см. [9.2-9.5]).

Кроме отличия скоростей основных строительных блоков, SONET и SDH отличаются характером использования заголовка. Эти различия в заголовке можно сгруппировать в две широкие категории: определение формата и интерпретация использования. В результате мы вынуждены описывать их отдельно.

Мы должны развеять некоторые представления, которые возникли благодаря неудачного использования слов и терминологии. Некоторые полагают, что раз SONET расшифровывается как синхронная оптическая сеть, то она работает только на оптоволоконной среде передачи. Однако это не так. Любая транспортная среда, которая способна создать необходимую полосу пропускания (измеренную в герцах, как можно предположить), будет передавать трафик SONET и SDH с требуемой линейной скоростью. Например, РРЛ в зоне прямой видимости, используя схему модуляции с плотной упаковкой бит, готовы транспортировать 622 Мбит/с (STS-12 и STM-4) в расчете на одну несущую, используя 40 МГц выделенной полосы частот.

Цель этого раздела провести обзор этих двух стандартов и некоторых нововведений, которые делают их интересными, например, использование указателей нагрузки. В разделе 9.2 описана технология стандарта SONET, а в разделе 9.3 - стандарта SDH. В разделе 9.4 проведено сравнение этих двух

стандартов в табличной форме. Описание технологий SONET и SDH читатель может найти также в работе [А-21].

Следует заметить, что в этой работе мы будем придерживаться общепринятой практики ссылок на документы/рекомендации ИТУ. Так, на документы, выпущенные до 1 января 1993 мы будем ссылаться, как на документы ССИТТ или ССІR. Если же они были выпущены после этой даты, то мы будем ссылаться на них, как на документы Международного союза электросвязи (ИТУ), причем, если они выпущены секцией Стандартизации в области электросвязи, то, как на документы ИТУ-Т, а если секцией Радиосвязи, то, как на ИТУ-R.

9.2. Синхронные оптические сети (SONET)

9.2.1. Структура синхронных сигналов

Технология SONET основана на синхронном цифровом сигнале, составленном из 8-битных полей — октетов (байтов), организованных в структуру фрейма. Фрейм может быть представлен двумерной матрицей, состоящей из N строк и M столбцов, где каждая ячейка матрицы содержит один байт. Верхний левый угол прямоугольной матрицы, представляющей фрейм, содержит идентифицируемый маркер, говорящий приемнику, является ли он началом фрейма.

SONET состоит из основной (первого уровня) структуры, названной STS-1, которая обсуждается ниже. Определение этого первого уровня, также определяет иерархию сигналов SONET в целом, потому что сигналы SONET верхних уровней получают путем мультиплексирования модулей нижних уровней. Когда модули нижних уровней мультиплексируются вместе, результирующий сигнал обозначается как STS- N (STS - синхронный транспортный сигнал), где N — целое число. Результирующий формат может быть преобразован в OC- N (OC - оптическая несущая) или в STS- N —

электрический сигнал. Существует целое кратное соотношение между скоростью основного модуля STS-1 и OC-N (а именно: $OC-N = N \times STS-1$). Только OC-1, OC-3, OC-12, OC-24, OC-48 и OC-192 фактически поддерживаются сегодня в иерархии SONET.

9.2.1.1. Основные конструктивные блоки

Фрейм STS-1 показан на рис. 9.3. STS-1 является основным модулем и конструктивным блоком SONET. Он передается в виде последовательности из 810 октетов (810 байт или 6480 бит), которые включают байты различных заголовков и емкость синхронной оболочки (SPE), транспортирующей полезную нагрузку. Автор использует термин «октет», а не «байт», подчеркивая в примечании, что это вызвано неоднозначностью в определении термина «байт»; на наш взгляд это дань традиции связистов, которые сами же и внесли эту неоднозначность, используя 2 понятия: 7-битный байт и 8-битный байт; в компьютерной терминологии (откуда этот термин и пришел) такой неоднозначности не было и нет: «байт» - поле длиной 8 бит, поэтому мы будем использовать понятие байт, а не октет. Фрейм STS-1 представлен в виде структуры из 9 строк и 90 столбцов (т.е. матрицы размера 9×90). Имея в виду периодичность повторения фрейма 125 мкс (8000 фреймов/с), получаем, что скорость передачи STS-1 равна 51,840 Мбит/с. Рассмотрим рис. 9.3. Порядок передачи структуры (схема развертки матрицы фрейма) — по строкам, слева — направо. В каждом байте STS-1 самый старший бит (MSB) передается первым. Как показано на рис. 9.3, первые три колонки фрейма STS-1 содержат транспортный заголовок. Эти три колонки имеют всего 27 байт (9×3), причем 9 из них — *секционный заголовок*, а 18 — *линейный заголовок*. Остальные 87 колонок составляют емкость оболочки STS-1, как показано на рис. 9.4.

Оболочка синхронной полезной нагрузки STS-1 (SPE) занимает всю полезную емкость STS-1. SPE состоит из 783 байт и показана как структура типа матрицы размера 9×87 . В этой структуре 1-ый столбец, содержащий 9

байт, предназначен для *маршрутного* (или *трактового*) *заголовка* (РОН). В SPE столбцы 30 и 59 не используются для полезной нагрузки, а резервируются под *фиксированные столбцы-наполнители* и не определяются. Однако значения, использованные в этих столбцах каждого STS-1 SPE используются в схеме вычисления ВР-8 для проверки на четность STS-1. Столбцы РОН и фиксированных наполнителей показаны на рис. 9.5. Фактически для полезной нагрузки STS-1 остается 84 байт-столбца или 756 байт.

Оболочка SPE фрейма STS-1 может начинаться где угодно в емкости оболочки STS-1. Как правило, SPE начинается в одном STS-1 фрейме и кончается в другом. Это показано на рис. 9.6. Однако, может быть и так, что SPE целиком располагается в одном фрейме. *Указатель полезной нагрузки STS-1* располагается в транспортном заголовке. Он указывает положение байта, где начинается SPE. Указатель полезной нагрузки описан в следующих параграфах.

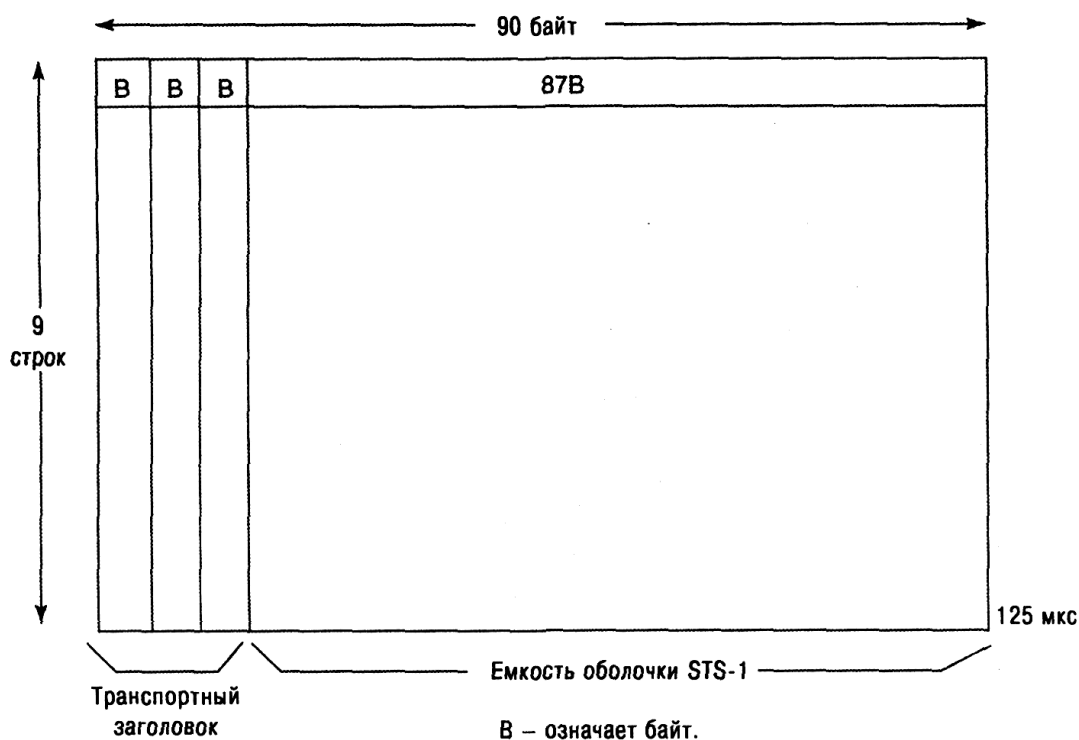


Рис. 9.3. Фрейм STS-1.

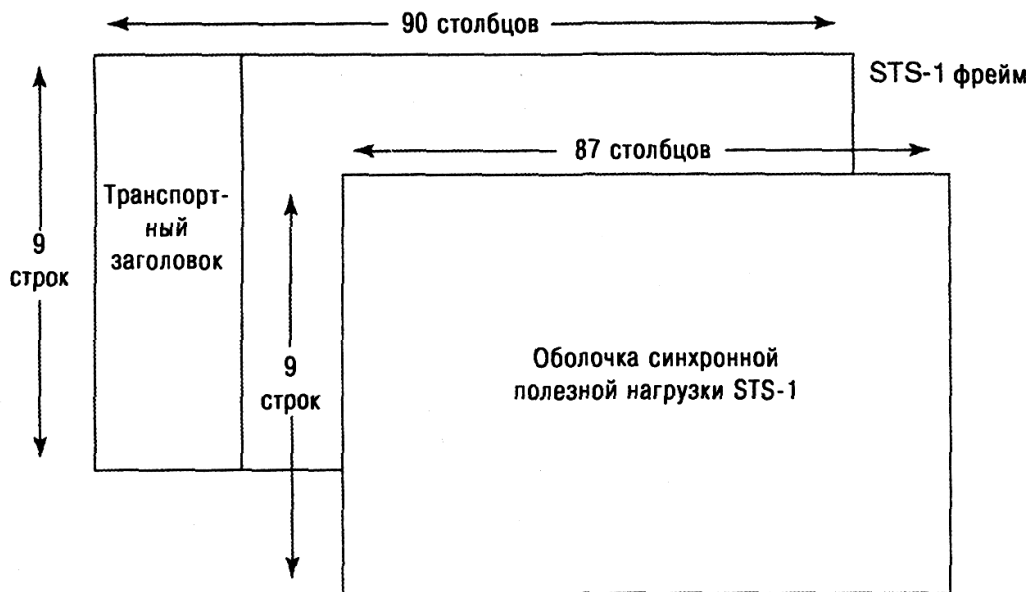


Рис. 9.4. Оболочка синхронной полезной нагрузки.

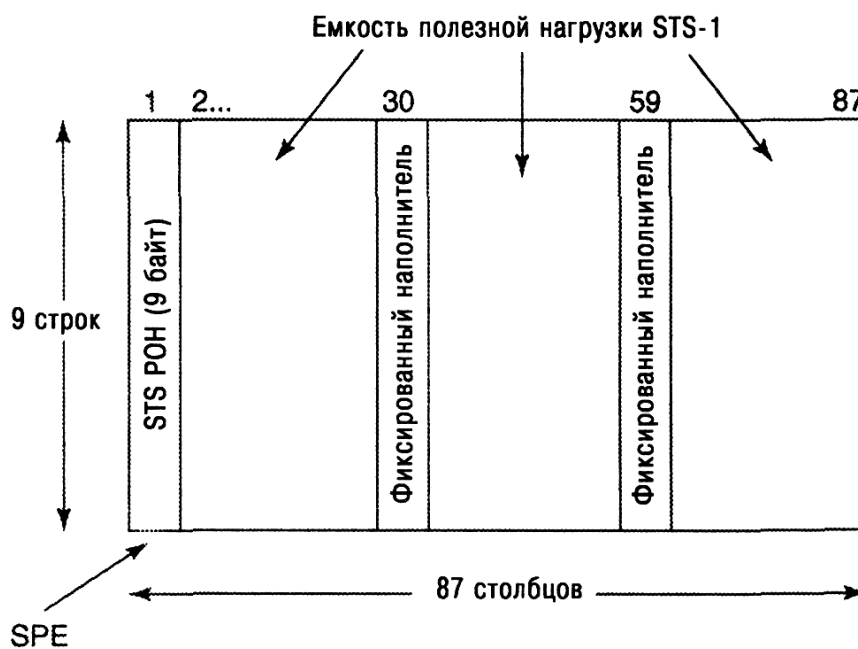


Рис. 9.5. Маршрутный заголовок (POH) и емкость полезной нагрузки в STS-1 SPE. Заметьте, что точная емкость полезной нагрузки STS-1 составляет 84 столбца. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

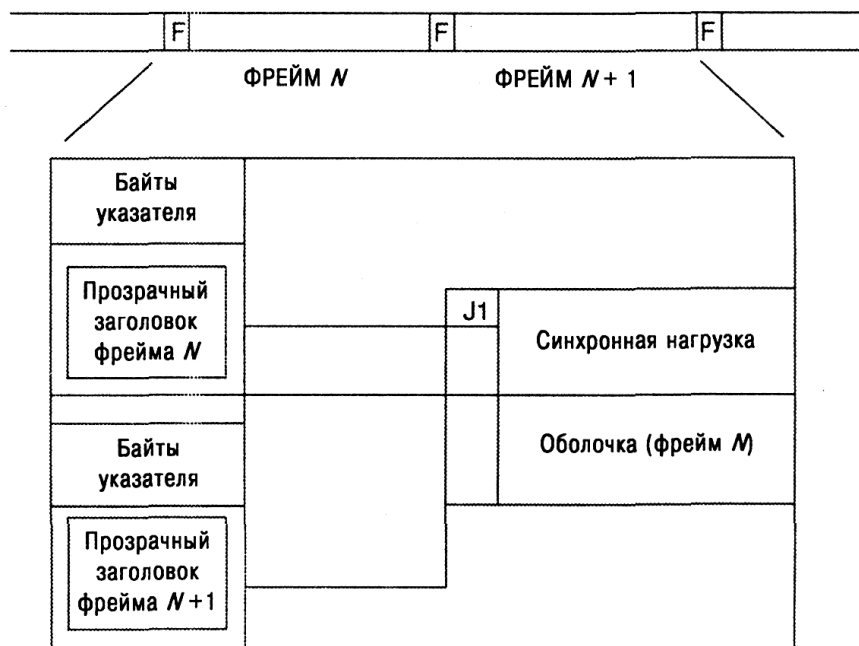


Рис. 9.6. Оболочка SPE STS-1 типично расположено в нескольких фреймах.
(С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

Заголовок POH STS ассоциируется с каждой полезной нагрузкой и используется для связи различных элементов информации (на протяжении всего маршрута), начиная с точки, где полезная нагрузка загружается (отображается) в STS-1 SPE, и кончая точкой, куда она доставляется. Среди таких элементов информации, передаваемых через POH, находятся сигналы аварийных состояний и различные показатели работоспособности системы.

9.2.1.2. Фреймы STS-N

На рис. 9.7 показана структура фрейма STS-N. Этот фрейм состоит из последовательности $N \times 810$ байт и формируется с помощью байт-интерливинга модулей STS-1 и STS-M ($3 \leq M \leq N$). Транспортный заголовок ассоциированной оболочки SPE STS не нужно выравнивать, так как каждый STS-1 имеет указатель нагрузки, что позволяет найти местоположение SPE или указать на факт конкатенации (называемой также сцепкой).

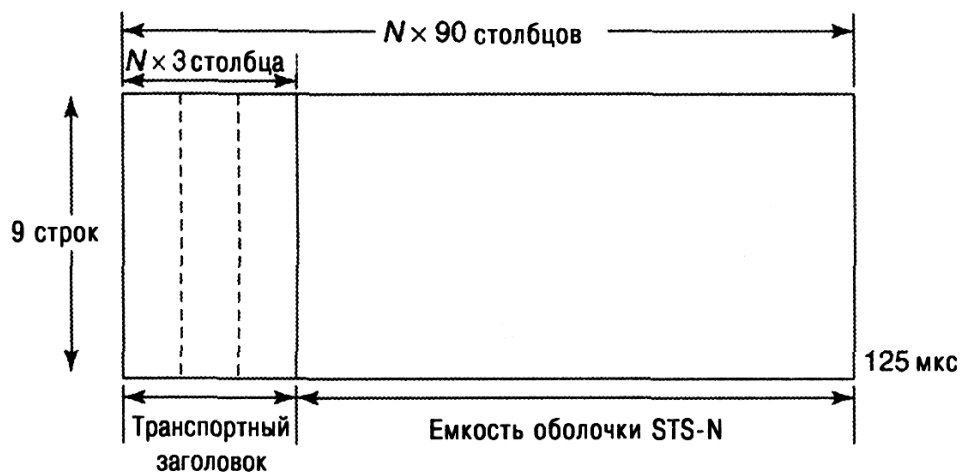


Рис. 9.7. Фрейм STS-N.

9.2.1.3. Конкатенация STS

Полезная нагрузка при повышенных скоростях передачи (скоростях выше 51,84 Мбит/с) требует нескольких оболочек SPE STS-1. Полезные нагрузки FDDI, и некоторых вариантов В-ISDN, относятся к этой категории. *Конкатенация* или *сцепка* на жаргоне специалистов связи, означает состыковку нагрузки (объединение ее в один непрерывный блок). Конкатенированный модуль STS-Nc формируется путем стыковки N составляющих модулей STS-1 вместе с фиксированной фазой. В этом случае повышенная скоростная нагрузка упаковывается для последующей передачи в результирующий SPE STS-Nc. Такой SPE STS-Nc требует оптической несущей OC-N или электрического сигнала STS-N. Индикаторы конкатенации, содержащиеся в указателях полезной нагрузки со второго по N , используются, чтобы показать, что модули STS-1, находящиеся в модуле STS-Nc, состыкованы вместе.

Всего в STS-Nc находится $N \times 783$ байта. Такой вариант формирования STS-Nc показан на рис. 9.8. Он изображается в виде структуры прямоугольной матрицы размера $9 \times (N \times 87)$ с 9 строками и $N \times 87$ столбцами. Учитывая факт стыковки, в оболочке SPE модуля STS-Nc требуется только один набор STS POH. В этом случае этот POH STS появляется в первом из N STS-1,

составляющих STS-Nc (см. [9.10]).

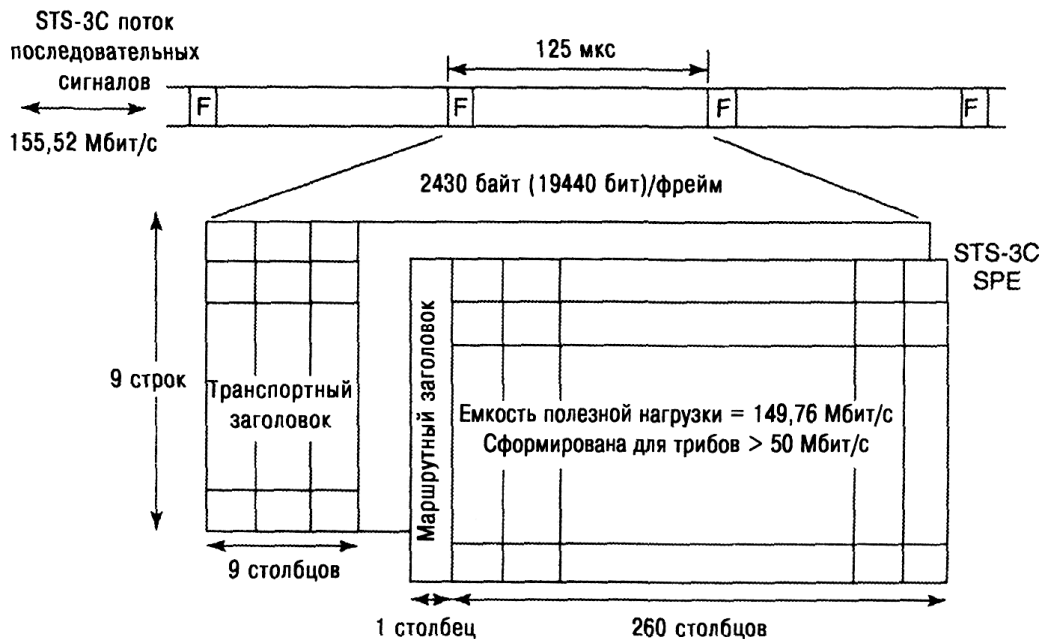


Рис. 9.8. Структура оболочки SPE конкатенированного модуля STS-Nc. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7])

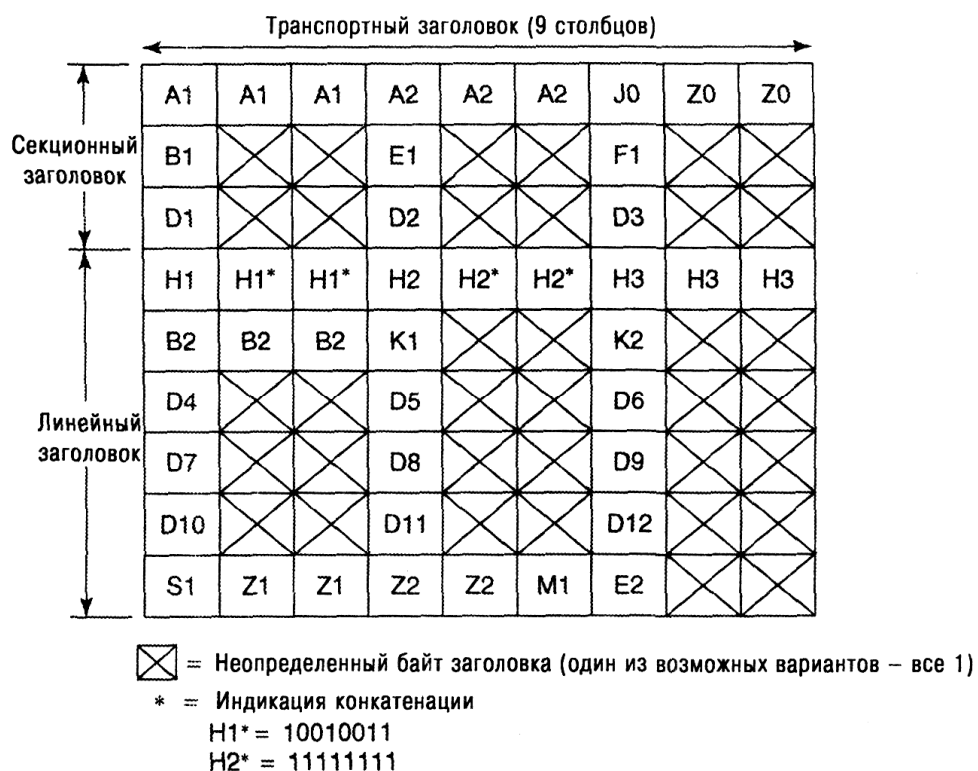


Рис. 9.9. Назначение байтов транспортного заголовка, показывающего ОС-3, несущий оболочку SPE модуля STS-3c. (С разрешения компании Telcordia Technology, GR-253-CORE, Issue 3, [9.6], рис. 3-8, с. 3.)

Рис. 9.9 показывает назначение байтов транспортного заголовка OC-3, несущей оболочку SPE модуля STS-Nc.

9.2.1.4. Структура виртуальных трибов

Оболочка SPE модуля STS-1 технологии SONET емкостью 50,11 Мбит/с была сформирована специально для транспортировки сигнала триба DS3. Для того, чтобы приспособиться к суб-скоростной (ниже скорости 51,84 Мбит/с) полезной нагрузке, такой как DS1, используется структура виртуальных трибов (VT) (термины и понятия трибов PDH и SDH см. в [A-20, A-21]). Она состоит из 4 типоразмеров: VT-1.5 (1,728 Мбит/с) для передачи DS1, VT-2 (2,304 Мбит/с) для передачи E1, VT-3 (3,456 Мбит/с) для передачи DS1C, VT-6 (6,912 Мбит/с) для передачи DS2. Концепция виртуальных трибов показана на рис. 9.10. Четыре конфигурации VT приведены на рис. 9.11. В структуре оболочки SPE модуля STS-1 (9×87) указанные VT занимают 3, 4, 6 и 12 столбцов соответственно.

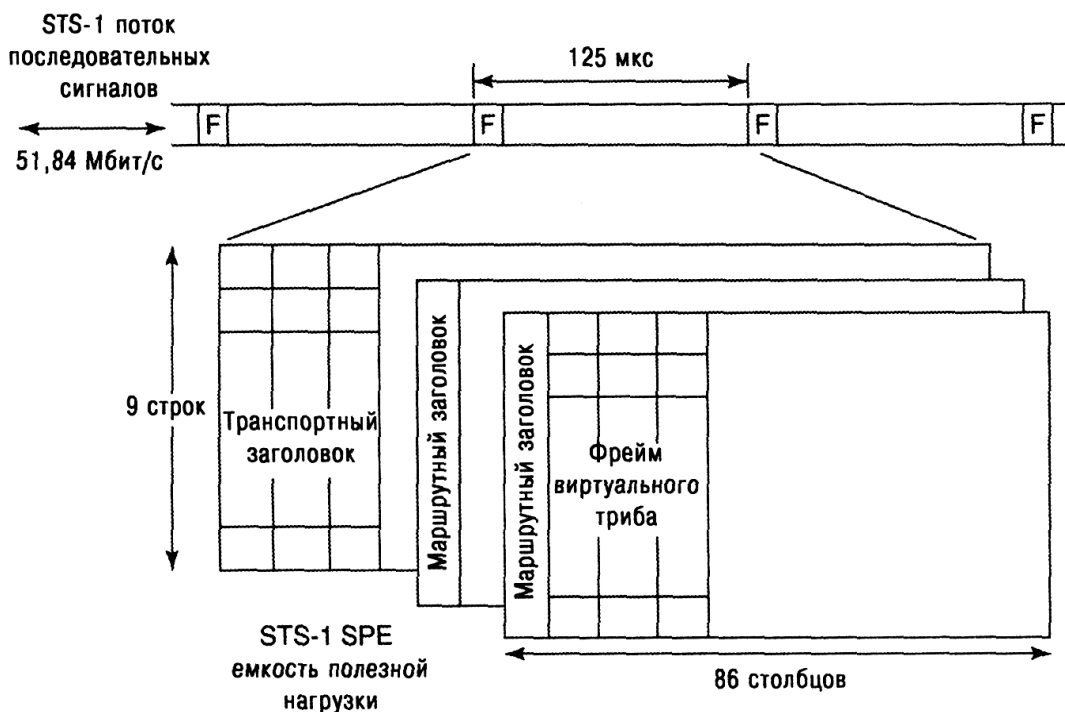


Рис. 9.10. Концепция виртуальных трибов. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

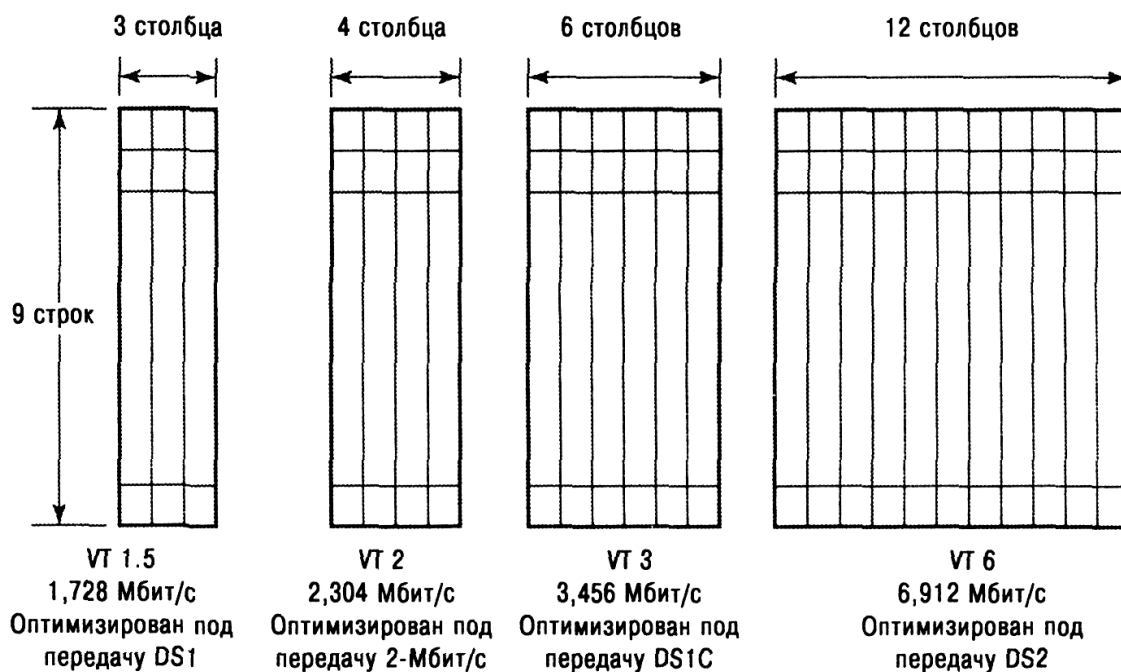


Рис. 9.11. Четыре типоразмера фреймов виртуальных трибов. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

9.2.2. Указатель полезной нагрузки

Указатель полезной нагрузки STS дает возможность гибкого и динамического выравнивания оболочки полезной нагрузки SPE модуля STS внутри поля оболочки, независимо от фактического содержимого SPE. SONET, по определению, синхронная технология. Она берет синхронизацию от высокоточных ведущих сетевых таймеров.

Современные цифровые сети должны иметь возможность использовать несколько таких таймеров. Например, в США такими сетями являются сети нескольких операторов дальней связи (IEC), которые имеют интерфейсы с операторами местной связи (LEC), на них установлены свои ведущие сетевые таймеры. Каждый ведущий таймер (Класса Stratum 1) функционирует независимо и имеет прекрасную стабильность (лучше, чем 10^{-11} в месяц), тем не менее все же могут быть некоторые небольшие временные вариации и среди таких таймеров. Конечно, они не выравниваются по фазе. При рассмотрении SONET нужно принимать во внимание возможность потери управления от ведущего таймера или потери сегмента доставки сигналов тай-

мера в сети синхронизации. В этом случае переключатель (источника синхронизации) сети переведет вас на менее стабильный внутренний источник (в соответствии с существующей практикой цифровых сетей связи в обеспечении синхронизации для оборудования связи). Эта ситуация должна быть решаемая в рамках SONET. Поэтому синхронная передача должна функционировать эффективно и в таких условиях, когда сетевые узлы работают с несколько отличающимися скоростями.

Для того, чтобы приспособиться к таким смещениям узловых таймеров, SPE может быть сдвинуто (выровнено) в положительном или отрицательном направлении на один байт по отношению к транспортирующему его фрейму. Это осуществляется путем пересчета, или модификации, указателя полезной нагрузки на каждом сетевом узле SONET. В дополнении к компенсации сдвига узловых таймеров, модификация указателя позволяет приспособиться к любому другому выравниванию фазы синхронизации, требуемому между входом сигналов SONET и сигналом опорной синхронизации данного сетевого узла. Этот процесс носит название *динамического выравнивания*, в рамках которого допускается плавание оболочки SPE модуля STS внутри оболочки STS.

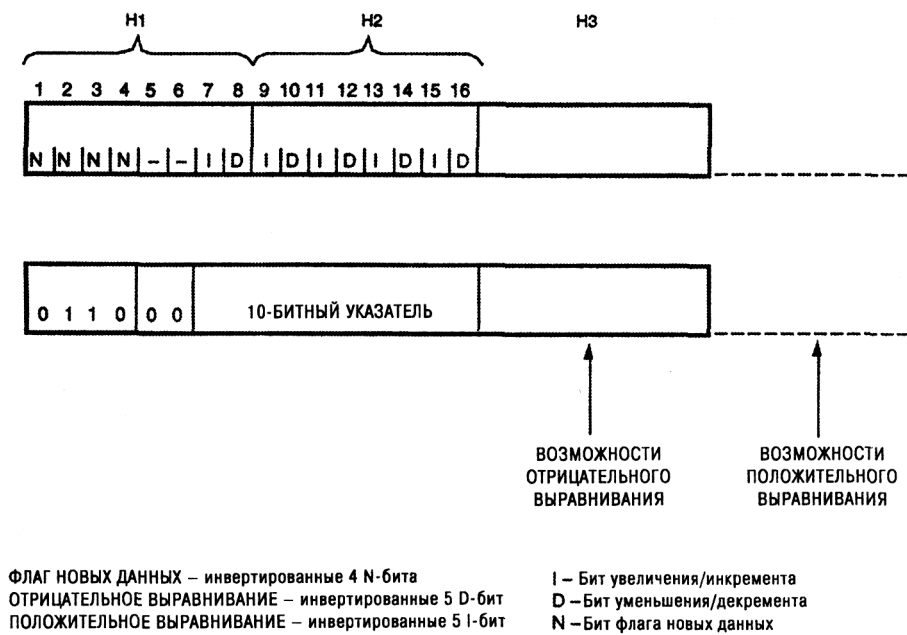


Рис. 9.12. Схема кодировки указателя полезной нагрузки (H1, H2). См. [9.1, 9.2, 9.6].

Указатель полезной нагрузки находится в байтах H1 и H2 линейного заголовка (LOH) и обозначает положение байта, с которого начинается оболочка SPE модуля STS. Эти два байта показаны на рис. 9.12. Биты с 1 по 4 в поле указателя несут *флаг новых данных* (NDF), биты 5 и 6 не определены, биты 7-16 содержат значение указателя.

Обсудим биты с 7 по 16 — значение указателя. Это двоичное число, которое может меняться в диапазоне от 0 до 782. Оно указывает смещение точки начала первого байта оболочки STE модуля STS, т.е. байта Л (первого байта POH SPE). Байты транспортного заголовка не учитываются в этом смещении. Например, значение смещения равно 0 указывает, что SPE STS начинается с байта, следующего сразу за байтом H3, тогда как смещение 87, указывает, что SPE начинается с байта, следующего сразу за байтом K2. Заметим, что эти байты заголовка показаны на рис. 9.9.

Процесс обработки указателя полезной нагрузки вносит ухудшение сигнала, известное как *джиттер выравнивания полезной нагрузки*. Это ухудшение появляется на принятом трибном сигнале после извлечения его из оболочки SPE, которая подвергалась изменениям указателя полезной нагрузки. Работа сетевого оборудования по обработке трибного сигнала сразу после такого извлечения оказывается под воздействием этого дополнительного джиттера. При аккуратно спроектированной сети распределения сигнала синхронизации, регулировка джиттера рабочей нагрузки может быть уменьшена, что приводит к снижению уровня трибного джиттера, который может быть аккумулирован в процессе транспортировки по синхронной сети.

9.2.3. Три уровня заголовков SONET

Три уровня заголовков внедрены в формат фрейма SONET:

1. Маршрутный (трактовый) заголовок (POH).
2. Линейный заголовок (LOH).
3. Секционный заголовок (SOH).

Эти уровни заголовков, представляются в виде перекрытий участков на маршруте SONET, как показано на рис. 9.13. Одной из важных функций, выполняемых этими заголовками, является поддержка функционирования, администрирования и обслуживания (OA&M).

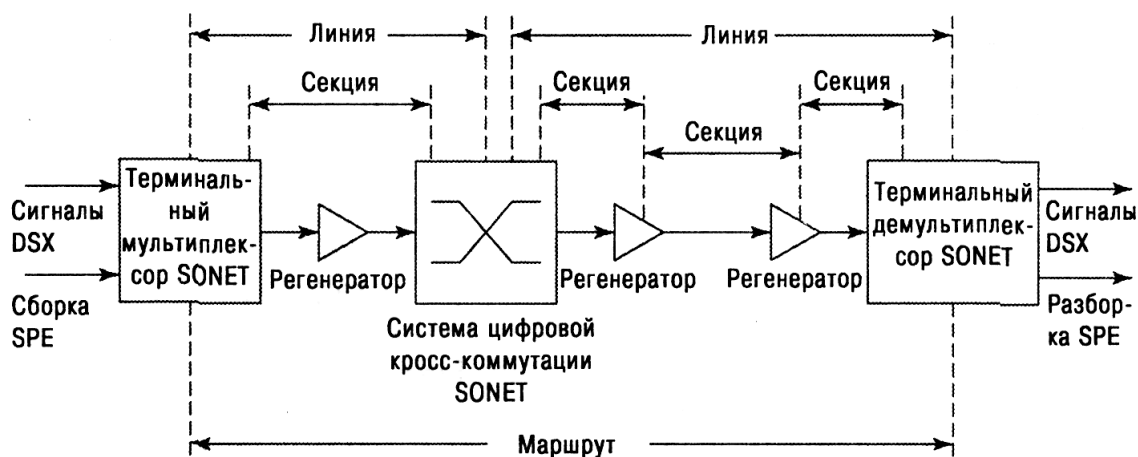


Рис. 9.13. Определение секции, линии и маршрута в технологии SONET. (См. [9.7], с. 2-28.)

Маршрутный заголовок (РОН) состоит из 9 байт и занимает первый столбец оболочки SPE, как было указано выше. Он создается в процессе сборки оболочки SPE, а затем включается в нее. Заголовок РОН обеспечивает средства для поддержки и обслуживания транспортировки SPE между терминальными мультиплексорами маршрута, где происходит сборка и разборка SPE. Среди специфических функций РОН отметим следующие:

- 8-битный (байт В3) контроль четности ВІР (четность чередующихся бит), вычисленный по всем битам предыдущего SPE; вычисленное значение помещается в РОН следующего фрейма;
- информация о сигналах аварийного состояния и показателях работоспособности (G1);
- метка 8-битного маршрутного сигнала (байт С2), содержащая детали структуры SPE, позволяет идентифицировать до 256 различных деталей;
- байт (J1), будучи повторенным на протяжении 64 фреймов, позволяет сформировать буквенно-цифровое сообщение, ассоциируемое с маршрутом;

оно позволяет провести верификацию непрерывности соединения вплоть до источника маршрутного сигнала от любого принимающего терминала вдоль маршрута, путем мониторинга строки сообщения;

- байт (F2), зарезервированный для инженерной связи сетевого оператора между оборудованием, установленным на маршруте.

Устройства для поддержки и обслуживания транспортировки SPE между соседними узлами, снабжаются линейными и секционными заголовками. Эти две группы заголовков совместно используют первые три столбца фрейма STS-1. Заголовок SOH занимает первые три верхние строки (всего 9 байт), а заголовок LOH - нижние шесть строк (18 байт).

Заголовком LOH выполняются следующие функции:

- указателя полезной нагрузки (байты H1, H2 и H3) (каждый STS-1 в фрейме STS-N имеет свой собственный указатель полезной нагрузки);

- управления автоматическим защитным переключением (байты K1 и K2);

- контроля четности на основе ВР (B2);

- канала передачи служебных данных емкостью 576 кбит/с (байты D4-D12);

- канала срочной инженерной связи (байт E2).

Секция определяется на рис. 9.13. Среди функций ее заголовка выделим следующие:

- шаблон выравнивания фрейма (синхронизации) (байты A1 и A2);

- идентификация STS-1 (байт C1): двоичное число, соответствующее порядку появления в фрейме STS-N, которое может быть использовано в процессе образования фрейма и деинтерливинга для определения положения других сигналов;

- контроль четности на базе ВР-8 (байт B1): мониторинг ошибок на уровне секции;

- канал передачи служебных данных (байты D1-D3);

- канал местной инженерной связи (байт E1);

- канал пользователя (байт F1), см [9.8, 9.9].

9.2.4. Процесс сборки/разборки SPE

Отображение полезной нагрузки — процесс сборки трибного сигнала и загрузки его в оболочку SPE. Это основная операция в технологии SONET. Емкость полезной нагрузки, предоставляемая для каждого трибного сигнала в отдельности, всегда несколько больше, чем это требуется для данного триба. Процесс отображения, в сущности, состоит в синхронизации (выравнивания) границ трибного сигнала и емкости полезной нагрузки. Это выравнивание достигается добавлением бит стаффинга к потоку бит, рассматриваемым как часть процесса отображения.

Примером этого может служить триб DS3, номинальная скорость которого 44,736 Мбит/с, а скорость в результате его отображения на SPE модуля STS-1 — 49,540 Мбит/с. Добавление к нему заголовка завершает процесс сборки SPE модуля STS-1 и увеличивает скорость составного сигнала до 50,110 Мбит/с. Процесс сборки SPE показан графически на рис. 9.14.

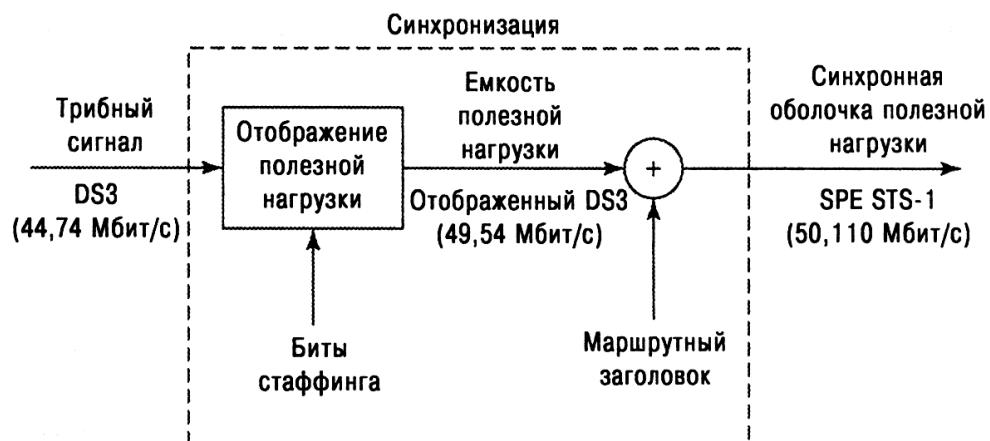


Рис. 9.14. Процесс сборки оболочки SPE. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

В конечной точке сетевого маршрута, или в точке вывода, исходная полезная нагрузка — триб DS3 должен быть извлечен, как и в нашем примере. Процесс разборки SPE показан на рис. 9.15. В этом случае

используется термин *обратное отображение полезной нагрузки*.

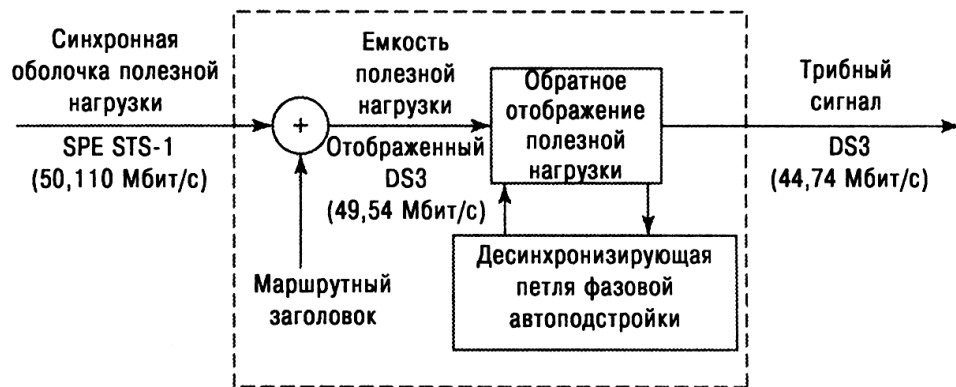


Рис. 9.15. Процесс разборки оболочки SPE. (С разрешения Agilent Technologies, [9.7].)

Процесс обратного отображения осуществляет десинхронизацию трибного сигнала от составного SPE сигнала, путем его освобождения от маршрутного заголовка и добавленных бит стаффинга. В нашем примере, SPE STS-1 с полезной нагрузкой DS3 прибывает в точку вывода триба в виде сигнала со скоростью 50,110 Мбит/с. Процесс разборки приводит к сигналу с разрывами непрерывности, представляющему транспортируемый сигнал DS3, со средней скоростью 44,74 Мбит/с. Разрывность во времени устраняется путем десинхронизирующей петли фазовой автоподстройки, на выходе которой формируется непрерывный сигнал DS3 с требуемой средней скоростью 44,736 Мбит/с [9.8, 9.9, 9.10].

9.2.5. Мультиплексирование ввода-вывода (ADM)

Мультиплексоры ввода-вывода (ADM) SONET мультиплексируют один или больше сигналов DS-N для формирования канала OC-N. Выполняя обратную функцию, ADM SONET демultipлексирует агрегатный сигнал STS-N, восстанавливая трибы (компонентные сигналы) DS-N, для вывода их пользователю или перенаправлению их в трибный поток. ADM может быть сконфигурирован для работы или в режиме ввода-вывода, или в терминальном режиме. В режиме ввода-вывода ADM может работать тогда, когда низ-

коскоростные сигналы DS1 терминируются на устройствах SONET, получающих синхронизацию от тех же самых или эквивалентных синхронных источников, так как сама система SONET, имеет интерфейсы с асинхронными источниками, но не берет от них синхронизацию.

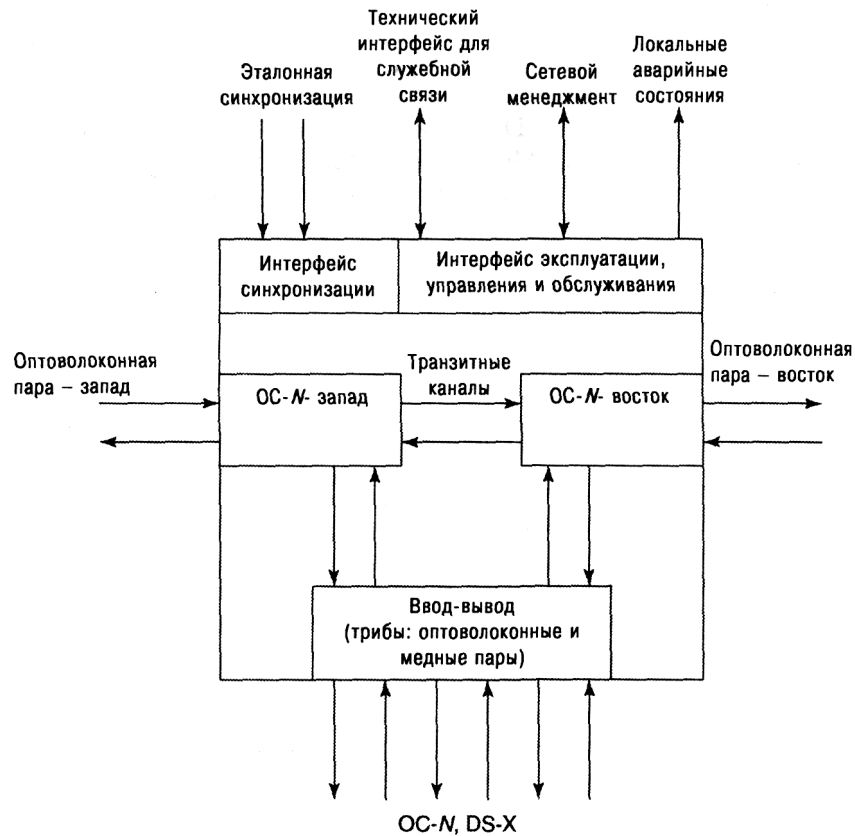


Рис. 9.16. Пример конфигурации ADM ввода-вывода SONET.

На рис. 9.16. приведен пример ADM, сконфигурированного для работы в режиме ввода-вывода с DS1 и DS-N интерфейсами. SONET ADM имеет интерфейсы с двумя полнодуплексными ОС-N сигналами и одним, или более, полнодуплексными DS1 сигналами. По выбору они могут обеспечить низкоскоростные интерфейсы типа DS1C, DS2, DS3 или ОС-M (где $M \leq N$). Существуют информационные полезные нагрузки без терминирования маршрута от каждого входящего сигнала ОС-N, которые проходят через ADM и передаются через интерфейсы ОС-N на другую сторону.

Синхронизация для переданных ОС-N берется или а) от внешнего источника синхронизации, б) от входящего сигнала ОС-N, в) от каждого вхо-

дящего сигнала OC-N в каждом направлении (называемая проходная синхронизация), г) от своего локального источника, в зависимости от сетевых приложений. Каждый интерфейс DS1 считывает данные с входящего OC-N и вводит данные в исходящий поток OC-N, как и требуется. На рис. 9.16 показан интерфейс синхронизации, для коммутации локальных приложений, с внешней синхронизацией и интерфейсным эксплуатационным модулем (OIM), который обеспечивает локальную служебную связь, локальную аварийную сигнализацию и интерфейс для дистанционной эксплуатации системы. Контроллер является частью каждого ADM, который поддерживает и управляет функциями ADM для подключения к локальным и удаленным интерфейсам и для подключения к требуемым (или по выбору) операционным каналам, которые допускают обслуживание, конфигурацию и тестирование.

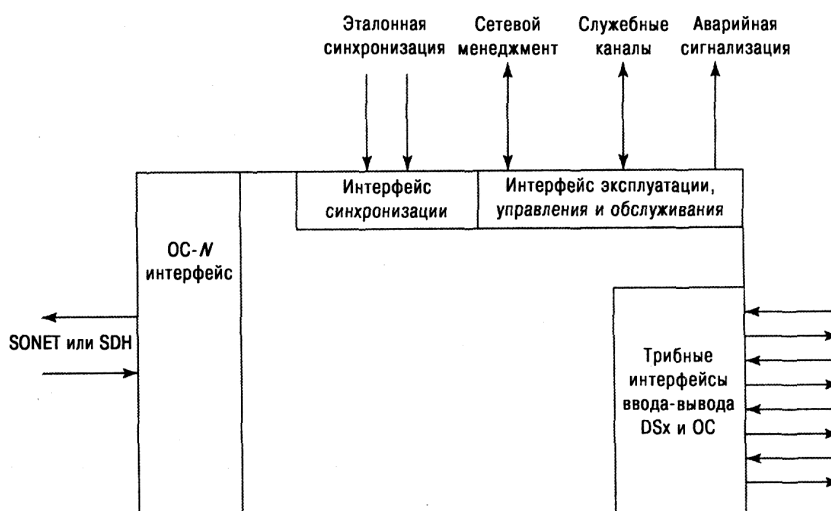


Рис. 9.17. Терминальная конфигурация ADM.

На рис. 9.17 показан пример ADM в терминальном режиме работы с интерфейсами DS1. В этом случае ADM мультиплексирует вплоть до $N \times 28DS1$ сигналов (или эквивалентных им, один DS3 содержит 28DS1) в один поток OC-N. Синхронизация для такой терминальной конфигурации берется: от внешнего источника синхронизации, принятого сигнала OC-N (по петле синхронизации), либо от собственного локального источника синхронизации, в зависимости от сетевых приложений [9.11].

9.2.6. Автоматическое защитное переключение (APS)

Во-первых, мы будем различать схемы защиты 1+1 и N+1. Эти две опции линейного APS показаны на рис. 9.18. APS может быть реализована в схеме линейной цепи или кольцевой архитектуры. Сетевой элемент SONET, имеющий *линейное оконечное оборудование (LTE)* и возможность терминировать оптические линии, может обеспечить *линейную APS*. Поддержка функции линейного APS для электрического интерфейса STS-N в соответствующих стандартах ANSI и Telcordia не предусмотрена.

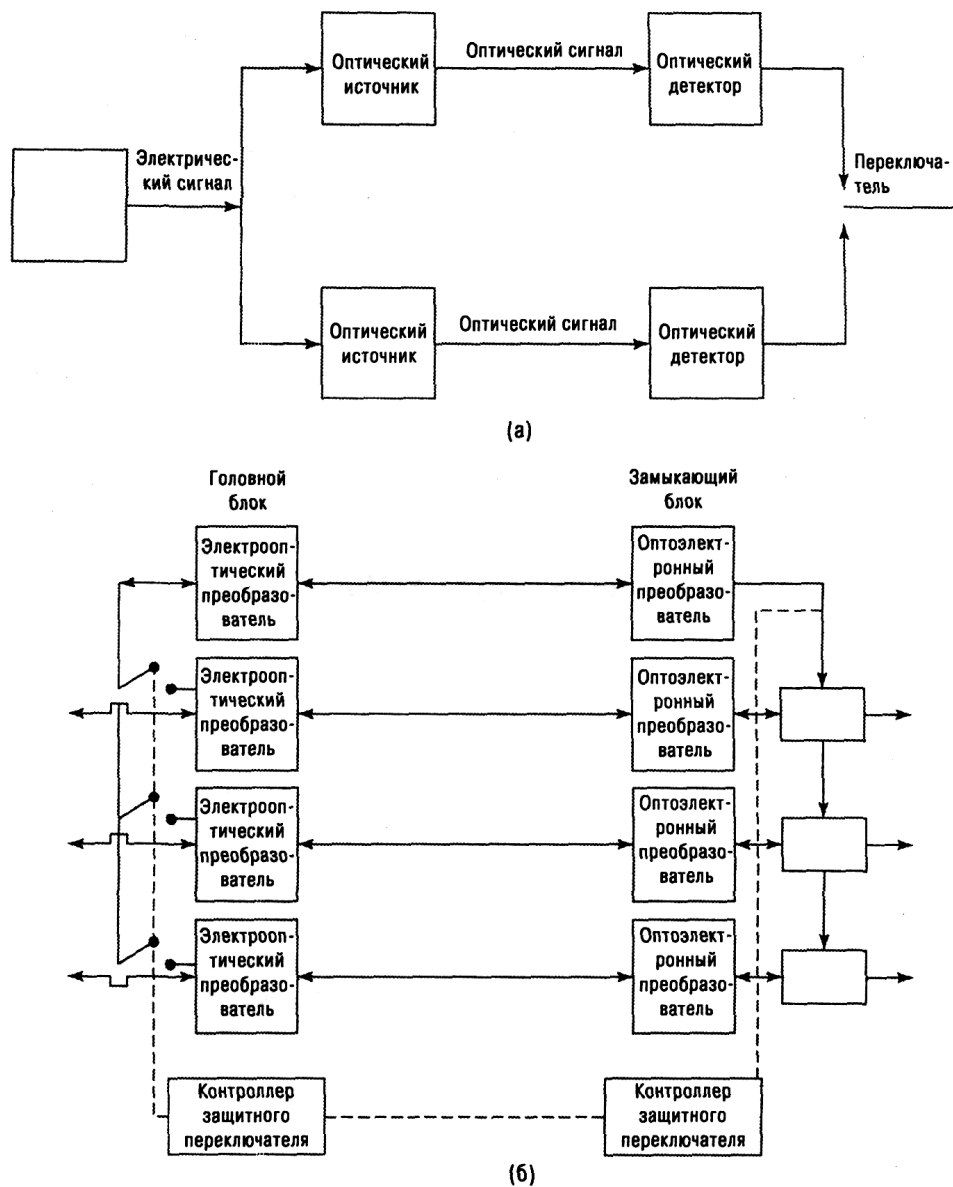


Рис. 9.18. Опции линейной APS, защиты: 1+1 и N+1. (а) линейная APS типа 1 + 1, (б) линейная APS типа 1+N.

Линейный APS и, в частности, протокол для канала APS, стандартизуется для того, чтобы допустить возможность взаимодействия между SONET LTE различных производителей. Поэтому, все SPE модуля STS, переносимые сигналом OC-N, защищены совместно. Стандарты ANSI и Telcordia определяют две линейных APS-архитектуры:

1. 1+1;

2. N+1 (обозначаемые также 1:1 и 1: n).

Архитектура 1 + 1 является такой архитектурой, в которой головной блок непрерывно переключается то к рабочему, то к резервному оборудованию, так что та же самая полезная нагрузка передается идентично к замыкающему блоку рабочего и резервного оборудования (см. верхнюю часть рис. 9.18). На замыкающем конце рабочие и резервные сигналы OC-N мониторятся независимо и идентично на отказ (или деградацию) сигнала. Принимающее оборудование выбирает либо рабочий, либо резервный сигнал на основе критерия переключения (напр., сигналов аварийного состояния, таких как LOS — потеря сигнала, или деградация сигнала и др.). Благодаря такому непрерывному переключению, архитектура 1+1 не позволяет организовать дополнительный (не резервированный) канал.

Резервирование по схеме 1+1 очень эффективный способ достичь полного резервирования. Этот тип конфигурации обычно широко распространен в кольцевой архитектуре. В основной схеме кольца, трафик от источника передается одновременно по обоим несущим, и решение о переключении с основного на резервный канал осуществляется на приемном конце. В этой ситуации только LOS, или подобные сигналы индикации аварийного состояния, требуются, чтобы инициировать резервное переключение, и нет необходимости в пересылке команды и управляющей информации между этими двумя точками. Предполагается, что после отказа в основной линии ремонтная бригада восстановит ее работоспособность. После этого, она, вместо того, чтобы снова стать основной линией, назначается как резервная. Следовательно, имеет место только одно переключение, и процесс ремонта не

требует второго перерыва сервиса.

Лучший способ конфигурирования сервиса 1+1 — это назначить в качестве резервной такую линию, которая географически отнесена от основной линии. Это минимизирует общий отказ линий. В силу простоты этого подхода, он гарантирует скорейшее восстановление и минимальные требования к оборудованию мониторинга и управления. Однако это решение и наиболее дорого и менее эффективно с точки зрения использования оборудования, по сравнению с резервированием по схеме $N+1$ (1: N). Его неэффективность в том, что резервное оборудование находится рядом, но не используется и, следовательно, не приносит дохода.

Резервирование по схеме $N+1$ (или 1: N , т.е. 1 для N) является архитектурой, в которой любые N рабочих линий могут быть перекрыты одной резервной линией (см. нижнюю часть рис. 9.18). Допустимыми для N могут быть значения от 1 до 14. Канал APS использует байты K1 и K2 линейного заголовка (LOH) для осуществления сигнализации между головной и замыкающей точками такой линии. Учитывая, что головная точка переключаема, резервная линия может быть использована для переноса дополнительного трафика. В некоторых публикациях выделяют подмножество 1:1 архитектуры $N+1$.

Схема резервирования $N+1$ дает возможность более эффективного использования резервного оборудования. Она является, по сути, расширением схемы резервирования 1+1, описанной выше. При условии высокой надежности современного оборудования, можно быть уверенным в отсутствии двух одновременных отказов на одном маршруте. Это дает возможность использовать одну общую резервную линию среди N работающих.

Схема резервирования $N+1$ делает возможным более эффективное использование оборудования, но одновременно требует реализации более сложного управления и не может предложить тот же уровень доступности, как схема резервирования 1+1. Достичь использования различных путей распространения для основного и резервного трафика также достаточно трудно.

топология наиболее популярна в кругах специалистов дальней оптоволоконной связи. Она предлагает то, что называют *географическим многообразием маршрутов*. Здесь же мы имеем в виду, что имеем круг достаточно большого диаметра (например, больше 16 км), такой, что существует определенная вероятность, что по крайней мере одна сторона кольца уцелеет при лесном пожаре, наводнении, ураганах, землетрясениях и других форс-мажорных обстоятельствах. Это значит, что только одна сторона кольца пострадает от обычного отказа оборудования или обрыва кабеля экскаватором.

Существуют некоторые виды кольцевой топологии, которые используются в телевизионных системах CATV HFC не столько с целью увеличения выживаемости, сколько для достижения возможности соединения, эффективного по стоимости. Кольца не используются в оптоволоконных сетях в помещениях или кампусах.

Существуют две основные схемы архитектуры *самовосстанавливающихся колец* (SHR): однонаправленные и двунаправленные. В зависимости от картины трафика и некоторых других факторов, одни типы колец могут подходить больше, чем другие.

В однонаправленном кольце SHR, показанном в левой части рис. 9.19, рабочий трафик передается только в одном направлении. Например, трафик, идущий от узла А к узлу D, распространяется по часовой стрелке (по маршруту ABCD), также, как и трафик, идущий от узла D к узлу А (маршрут DA). Емкость однонаправленного кольца определяется суммарными требованиями трафика между парой узлов кольца.

В двунаправленном кольце SHR, показанном в правой части рис. 9.19, рабочий трафик передается в кольце в обоих направлениях, используя два параллельных пути между узлами (используя один и тот же кабель). Используя пример, аналогичный приведенному выше, можно заметить, что если трафик от узла А к узлу D идет по часовой стрелке через промежуточные узлы В и С, то трафик от узла D к узлу А мог бы возвратиться по тому же

пути, проходя те же промежуточные узлы В и С.

В двунаправленном кольце, трафик в обоих направлениях передачи между двумя узлами проходит через те же самые наборы промежуточных узлов. Следовательно, в отличие от тайм-слота однонаправленного кольца, тайм-слот двунаправленного кольца может быть повторно использован несколько раз в том же кольце, обеспечивая лучшую утилизацию его емкости. Все узлы на таком кольце вместе используют емкость защитного трафика, независимо от того, какое количество раз данный тайм-слот был повторно использован. Двунаправленная маршрутизация также более удобна на больших кольцах, где приходится принимать во внимание задержку на распространение сигнала, так как она обеспечивает механизм, позволяющий надеяться, что при нормальных условиях используется кратчайший путь, в отличие от ситуации с отказами, влияющими как на рабочие, так и резервные пути, а также с отказами узла.

Telcordia в [9.6] указывает, что термин *однаправленный* имеет двойственное значение (см. *Замечание*). Поэтому, переключение влияет только на одно направление в двунаправленной схеме. В результате этого, различные узлы, через которые проходят любые пути, пострадавшие от обрыва волокна или других отказов, на обязательно должны быть связаны друг с другом. Это делает архитектуру UPSR существенно проще, чем двунаправленное кольцо.

Замечание. Термин «однаправленный» в UPSR относится к направлению трафика вокруг кольца, и это не надо путать с тем фактом, что UPSR построено в расчете на двунаправленную симметричную передачу.

9.3. Синхронная цифровая иерархия SDH

9.3.1. Введение

Технология SDH во многом напоминает SONET. Она использует

отличную от SONET терминологию, часто при описании тех же функций. Она отстает на несколько лет от SONET по срокам внедрения. История говорит нам, что SDH будет больше распространена в мире, чем SONET, так как будет распространена во всех странах, использующих ветвь PDH, основанную на E1.

9.3.2. Стандартные скорости передачи SDH

Иерархия SDH была построена на основной скорости синхронного транспортного модуля STM-1 - 155,520 Мбит/с. Более высокая емкость STM формируется на скоростях, которые в N раз выше этой основной скорости. В настоящее время определены уровни STM для $N = 4, 16, 64$ (скорость с коэффициентом 256 пока еще не стандартизована). Таблица 9.2 показывает скорости, допустимые для иерархии SDH (G.707, [9.5]), и их эквиваленты в технологии SONET. Основная структура мультиплексирования SDH показана на рис. 9.2.

Таблица 9.2

Скорости иерархии SDH [9.5]

| Уровень SDH | Уровень SONET | Скорость (кбит/с) |
|-------------|----------------|-------------------|
| 1 | STS-3/OC-3 | 155 520 |
| 4 | STS-12/OC-12 | 622 080 |
| 16 | STS-48/OC-48 | 2 488 320 |
| 64 | STS-192/OC-192 | 9 953 280 |

9.3.3. Определения

Синхронный транспортный модуль (STM). Модуль STM является информационной структурой, используемой для поддержки соединений на уровне секций в сети SDH. Он состоит из полезной нагрузки и секционного заголовка (SOH) — информационных полей, организованных в виде фрейма, повторяющегося каждые 125 мкс. Эта информация подготавливается определенным образом для последовательной передачи по выбранной среде

передачи на скорости, которая синхронизируется с сетью. Как упомянуто выше, основной модуль STM соответствует скорости 155,520 Мбит/с и называется STM-1. Модули большей емкости формируются на скоростях, равных базовой, умноженной на N . На сегодня емкости STM определены для $N = 4, 16, 64$ (и 256, см. замечание выше). На рис. 9.20 приведена структура модуля STM-1.

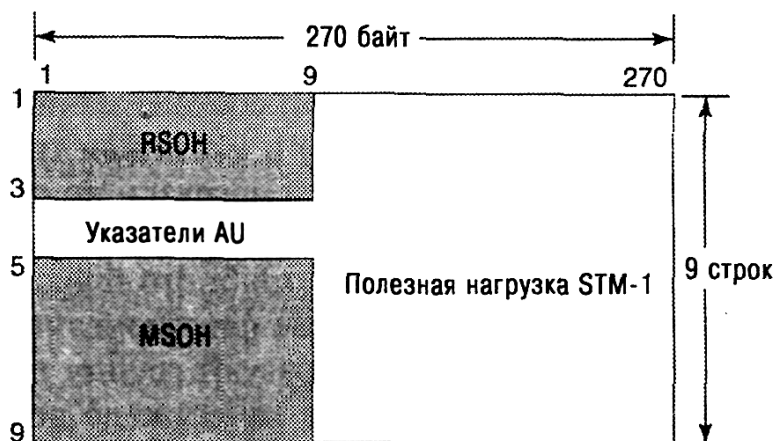


Рис. 9.20. Структура фрейма STM-1: RSOH - заголовок регенераторной секции, MSOH - заголовок мультиплексной секции.

Модуль STM-1 включает одну группу административных блоков (AUG) вместе с секционным заголовком (SOH). Модуль STM- N содержит N групп AUG вместе с SOH. На рис. 9.21 показан модуль STM- N .

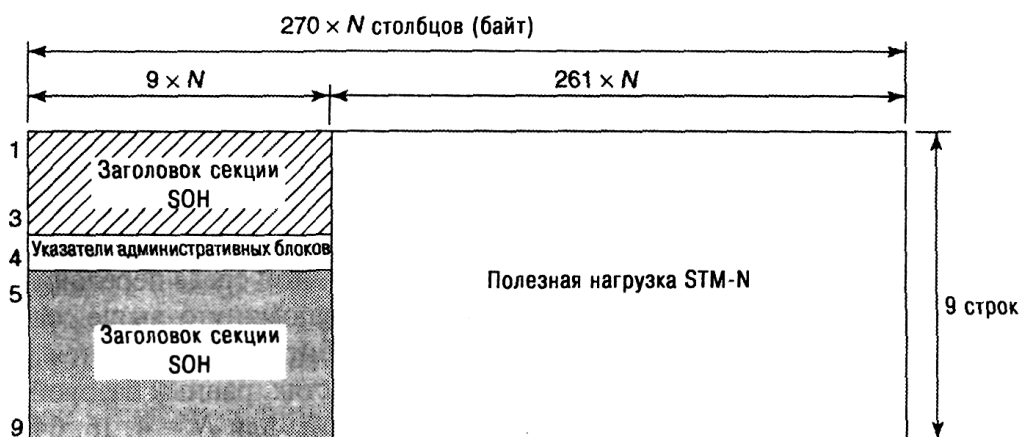


Рис. 9.21. Структура фрейма STM- N .

Виртуальные контейнеры (VC- n). Виртуальный контейнер является информационной структурой, используемой для поддержки соединений на маршрутном уровне в сети SDH. Он состоит из полезной нагрузки и маршрутного заголовка (РОН) — информационных полей, организованных в виде фрейма, который повторяется каждые 125 или 500 мкс. Информация по выравниванию фрейма для идентификации начала фрейма VC- n обеспечивается сетью обслуживания.

Виртуальные контейнеры делятся на два типа:

1. Виртуальные контейнеры нижнего уровня: VC- n ($n = 1,2,3$). Они состоят из контейнера уровня n и соответствующего ему заголовка РОН;
2. Виртуальные контейнеры верхнего уровня: VC- n ($n = 3,4$). Они состоят из контейнера уровня n и соответствующего ему заголовка РОН или групп трибных блоков TUG-2 и TUG-3 (последние обычно не включаются в класс виртуальных контейнеров, см. [A-20, A-21]).

Административные блоки (AU- n). Административный блок является информационной структурой, которая осуществляет адаптацию между маршрутным уровнем верхнего порядка и уровнем мультиплексной секции. Он состоит из полезной нагрузки (виртуальных контейнеров верхнего уровня) и указателя административного блока, который показывает смещение начала полезной нагрузки по отношению к началу мультиплексной секции.

Определены два административных блока. Блок AU-4 состоит из VC-4 и указателя административного блока, который определяет фазовое выравнивание VC-4 по отношению к фрейму STM-N. Блок AU-3 состоит из VC-3 и указателя административного блока, который определяет фазовое выравнивание VC-3 по отношению к фрейму STM-N. В каждом случае положение указателя AU фиксируется по отношению к фрейму STM-N.

Один или более AU, занимающих определенные фиксированные позиции в полезной нагрузке STM, образуют группу AU (AUG). Группа AUG состоит из однородных блоков: AU-3 или AU-4.

Трибные блоки (TU- n). Трибный блок является информационной структурой, которая осуществляет адаптацию между маршрутным уровнем нижнего порядка и маршрутным уровнем верхнего порядка. Он состоит из полезной нагрузки (виртуального контейнера нижнего уровня) и указателя трибного блока, который показывает смещение начала полезной нагрузки по отношению к началу виртуального контейнера верхнего уровня.

Блок TU- n ($n = 2,3$) состоит из VC- n и указателя трибного блока. Один или более трибных блоков, занимающих определенные фиксированные позиции в полезной нагрузке VC- n верхнего уровня, образуют группу трибных блоков (TUG). Группа TUG определяется так, что в качестве ее полезной нагрузки могут выступать трибные блоки различного размера для увеличения гибкости транспортной сети.

Группа TUG-2 состоит из однородной сборки идентичных TU-1 или TU-2.

Группа TUG-3 состоит из однородной сборки идентичных TUG-2 или TU-3.

Контейнеры (C- n , $n = 1,2,3,4$). Контейнер - информационная структура, которая формирует сетевую синхронную полезную нагрузку для виртуального контейнера. Для каждого из набора виртуальных контейнеров VC- n существует соответствующий контейнер C- n . Функции адаптации были определены для большинства общих сетевых скоростей, для сведения их к ограниченному набору стандартных контейнеров. Эти скорости включают все скорости, определенные в рекомендации CCITT G.702 (контейнер C-2 определен только для T2 и не определен для E2, см. [A-20, A-21]).

Указатели. Указатель показывает величину смещения фрейма виртуального контейнера по отношению к опорному фрейму логического транспортного средства, который им поддерживается.

9.3.3.1. Основные соглашения

Порядок передачи информации на всех диаграммах и рисунках во всех

подразделах раздела (9.3) таков: сначала слева направо, затем сверху вниз. Внутри каждого байта самый старший бит передается первым. Самый старший бит (1) показан всегда слева на всех диаграммах, рисунках и таблицах.

9.3.4. Основная схема мультиплексирования SDH

На рис. 9.22 показаны соотношения между различными мультиплексирующими элементами, которые описаны ниже. На ней также показана общая схема мультиплексирования SDH.

На рис. 9.23-9.27 приведены примеры образования различных сигналов, которые мультиплексируются, используя мультиплексирующие элементы, показанные на рис. 9.22.

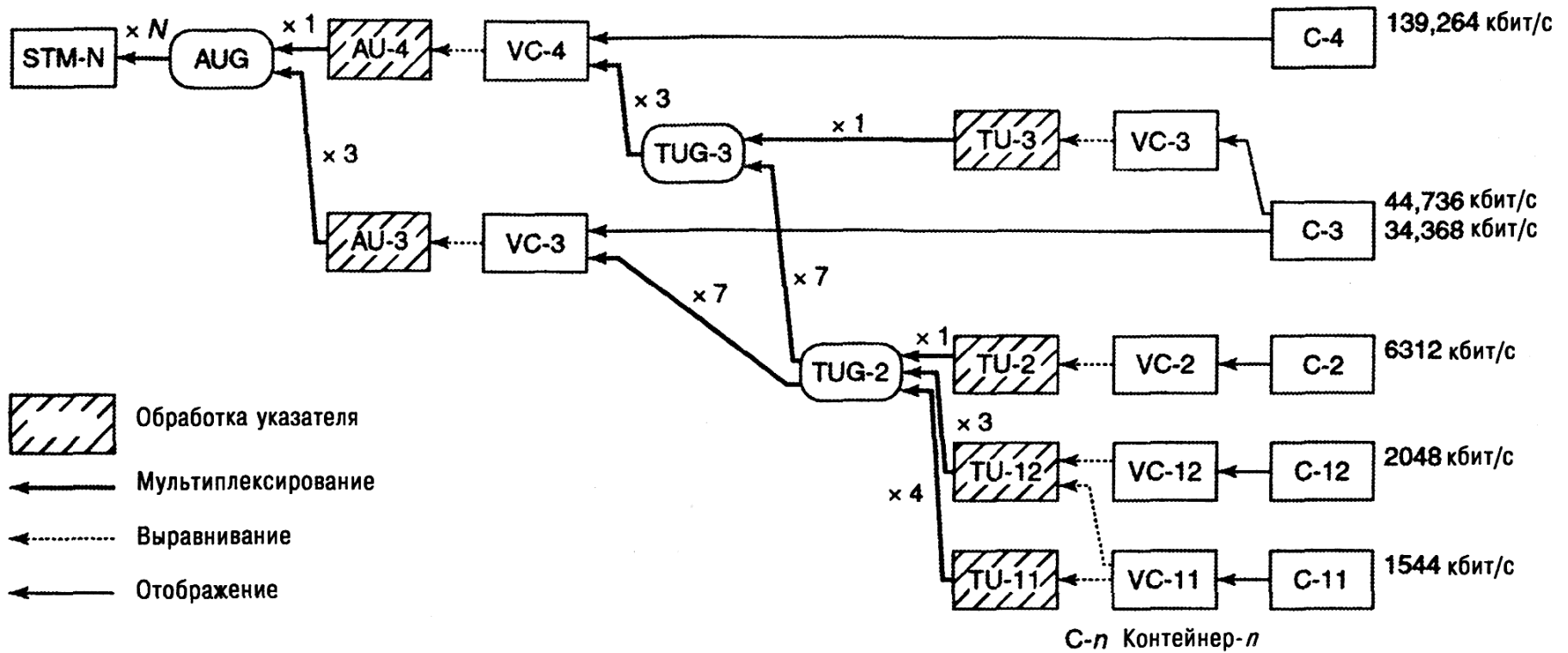
9.3.4.1. Административные блоки (AU) фрейма STM-N

Полезная нагрузка STM-N может поддерживать N групп AUG, причем каждый AUG может состоять из:

- одного AU-4 или
- трех AU-3.

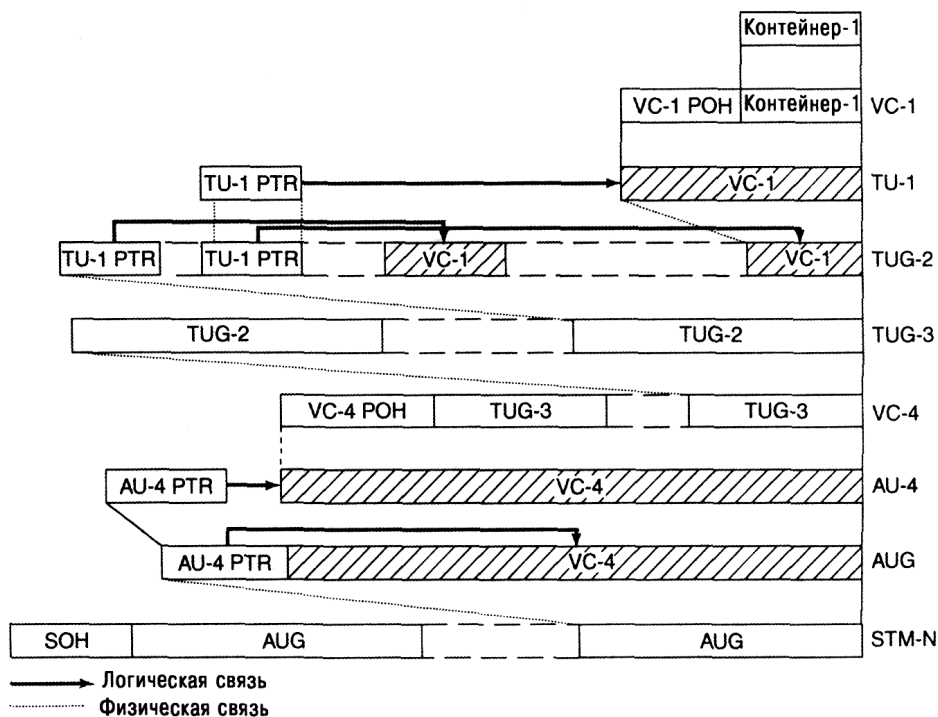
Виртуальный контейнер VC- n , ассоциированный с каждым AU- n , не имеет фиксированной фазы по отношению к фрейму STM- N . Положение первого байта VC- n определяется указателем AU- n . Указатель AU- n находится в фиксированной ячейке фрейма STM- N . Это иллюстрируется примерами на рис. 9.21 и 9.23-9.28.

Блок AU-4 может быть использован для передачи, с помощью VC-4, ряда блоков TU- n ($n = 1,2,3$), формирующих два каскада мультиплексирования. Пример этого приведен на рис. 9.27(а) и 9.28(а). Виртуальный контейнер VC- n , ассоциированный с каждым TU- n , не имеет фиксированной фазы по отношению к началу VC-4. Указатель TU- n находится в фиксированной ячейке в VC-4, и положение первого байта VC- n определяется указателем TU- n .



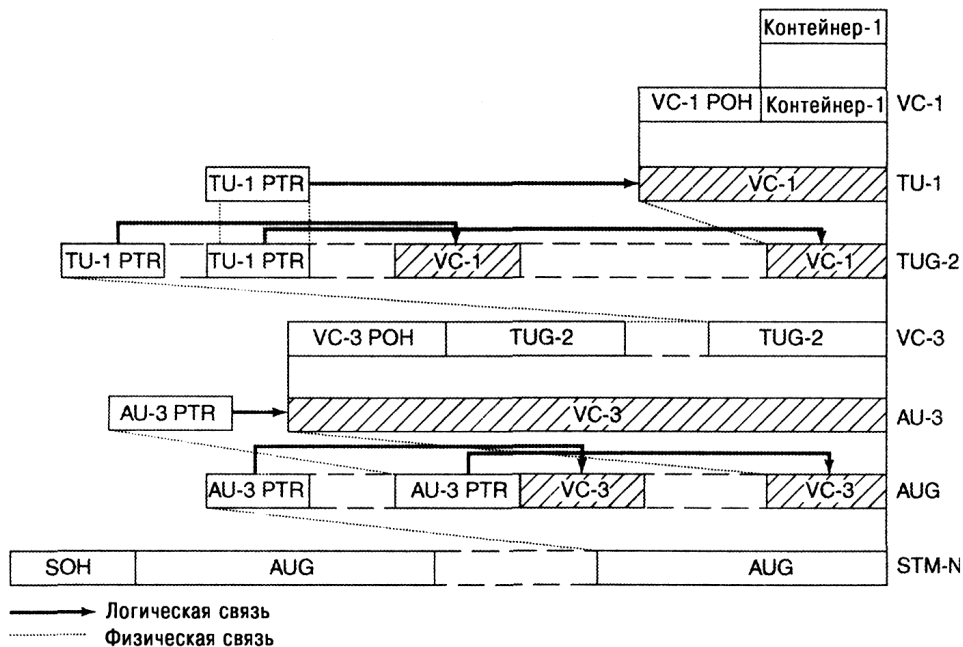
Замечание: Показаны трибы G.702, связанные с контейнерами С-х. Другие сигналы, например, АТМ, также могут быть использованы

Рис.9.22. Обзор структуры мультиплексирования (См.[9.13], ИТУ-Т G.707, рис.6-1, с.6)



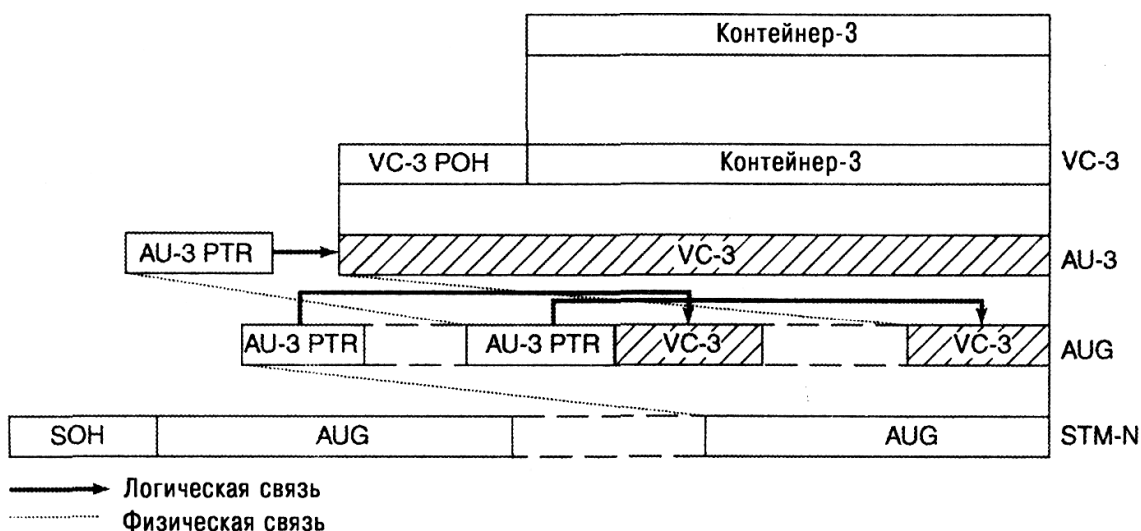
Замечание: не заштрихованные области выровнены по фазе. Фазовое выравнивание между заштрихованными и не заштрихованными областями определяется указателем (PTR) и показано стрелкой

Рис. 9.23. Метод мультиплексирования от контейнера C-1 до AU-4. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-2, с. 7.)



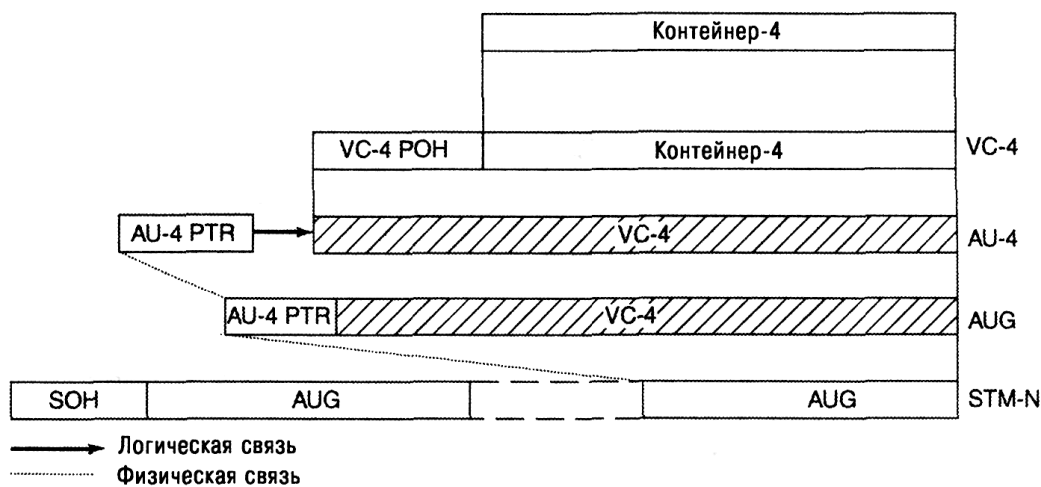
Замечание: не заштрихованные области выровнены по фазе. Фазовое выравнивание между заштрихованными и не заштрихованными областями определяется указателем (PTR) и показано стрелкой

Рис. 9.24. Метод мультиплексирования от контейнера C-1 до AU-3. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-3, с. 7.)



Замечание: не заштрихованные области выровнены по фазе. Фазовое выравнивание между заштрихованными и не заштрихованными областями определяется указателем (PTR) и показано стрелкой)

Рис. 9.25. Метод мультиплексирования от контейнера C-3 до AU-3. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-4, с. 9.)



Замечание: не заштрихованные области выровнены по фазе. Фазовое выравнивание между заштрихованными и не заштрихованными областями определяется указателем (PTR) и показано стрелкой)

Рис. 9.26. Метод мультиплексирования от контейнера C-4 до AU-4. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-5, с. 10.)

Блок AU-3 может быть использован для передачи, с помощью VC-3, ряда блоков TU- n ($n = 1,2$), формирующих два каскада мультиплексирования. Пример этого приведен на рис. 9.27(б) и 9.28(б). Виртуальный контейнер VC- n , ассоциированный с каждым TU- n , не имеет фиксированной фазы по

отношению к началу VC-3. Указатель TU-*n* находится в фиксированной ячейке в VC-3, и положение первого байта VC-*n* определяется указателем TU-*n*.

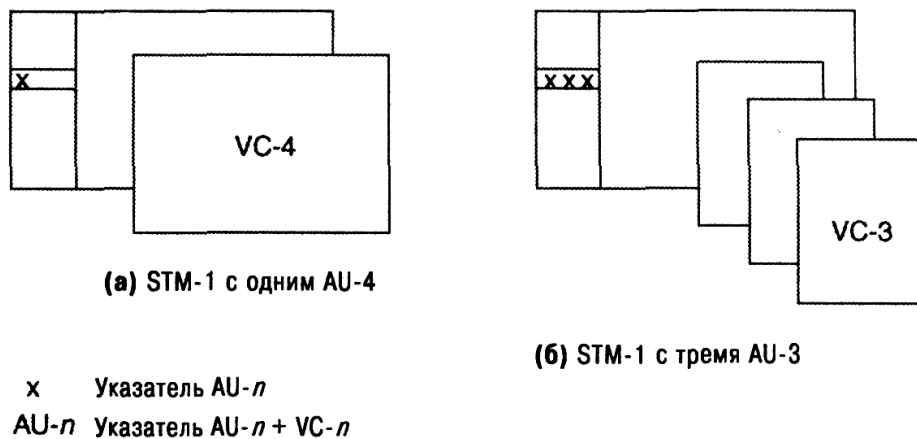


Рис. 9.27. Административный блок в фрейме STM-1. (См. [9.13], ИТУ-Т G.707, рис. 6-7, с. 12.)

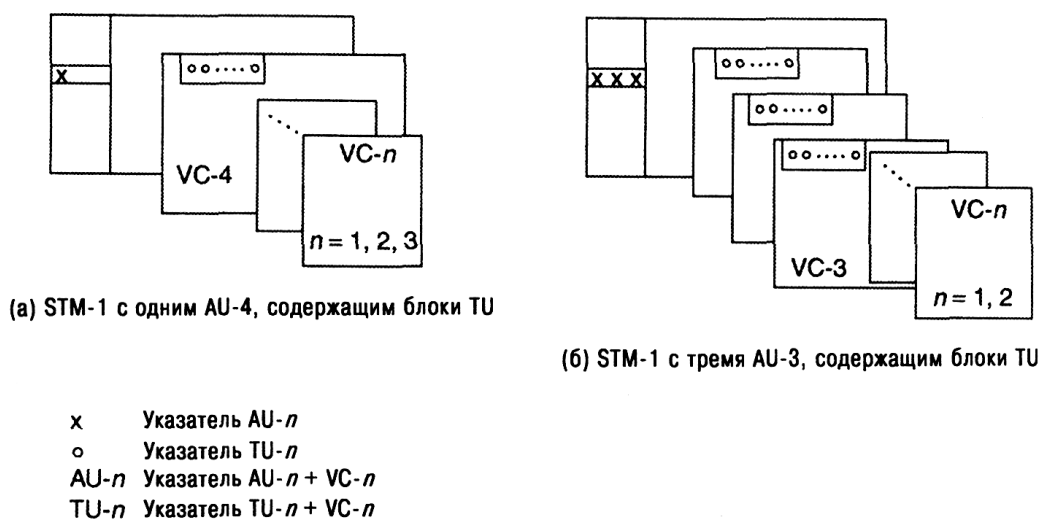
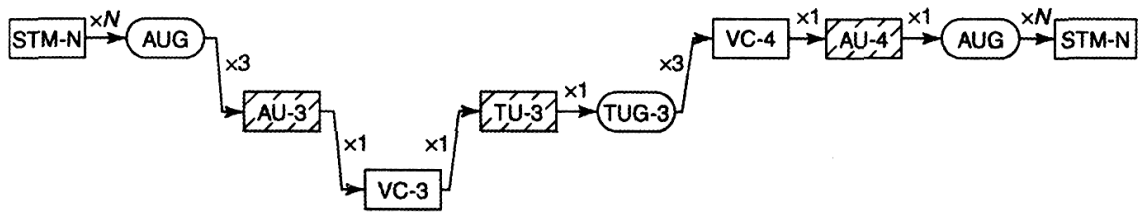


Рис. 9.28. Два каскада мультиплексирования. (См. [9.13], ИТУ-Т G.707, рис. 6-8, с. 12.)

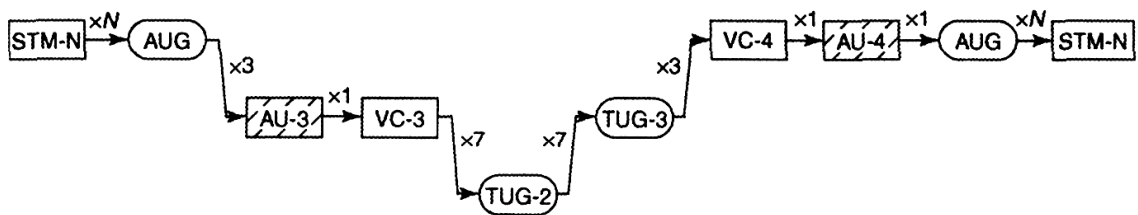
9.3.4.2. Взаимная связь фреймов STM-N

Технология SDH проектировалась как универсальная технология, допускающая транспорт самых различных сигналов, включая те, что специфицированы в стандарте ССИТТ G.702. Однако для транспорта

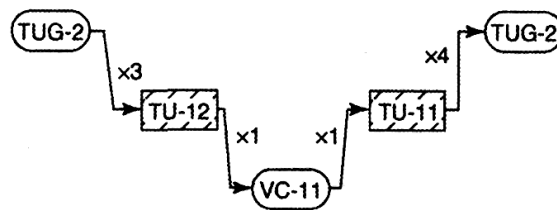
виртуальных контейнеров могут быть использованы различные структуры. При этом должны быть использованы следующие два правила взаимной связи (см. G.707):



(а) Взаимная связь VC-3 с полезной нагрузкой C-3.



(б) Взаимная связь через группы TUG-2,3.



(в) Взаимная связь через VC-11.

Рис. 9.29. Взаимная связь модулей STM-N. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-9, с. 16.)

1. Правила для взаимной связи двух AUG основаны на различии двух типов AU, а именно: AU-3 и AU-4, они гласят: используй структуру AU-4. Поэтому AUG, собранный на основе AU-3, будет демультиплексирован до уровня VC-3 или TUG-2 (в зависимости от типа полезной нагрузки) и ремультимплексирован до AUG с использованием пути через TUG-3/VC4/AU-4. Это показано на рис. 9.29(а) и 9.29(б).

2. Правила для взаимной связи VC-11, транспортируемых через различные типы TU, а именно: TU-11 и TU-12, гласят: используй структуру TU-11. Это показано на рис. 9.29(в). VC-11, TU-11 и TU-12 описаны ниже. Такие правила взаимной связи в SDH не изменяют правил взаимодействия,

описанных в рекомендации ITU-T G.802 для сетей, основанных на различных ветвях PDH и различных законах кодирования голоса.

9.3.4.3. Скремблирование

Скремблирование обеспечивает достаточное наполнение бит синхронизации при переходе через интерфейс NNI, чтобы поддерживать синхронизацию и выравнивание. На рис. 9.30 приведена функциональная блок-схема скремблера синхронного фрейма. Порождающим для скремблера является полином $1 + X^6 + X^7$.

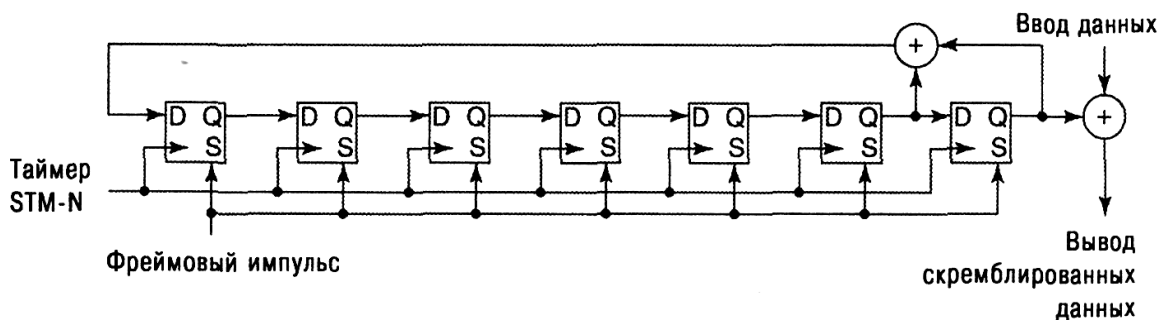
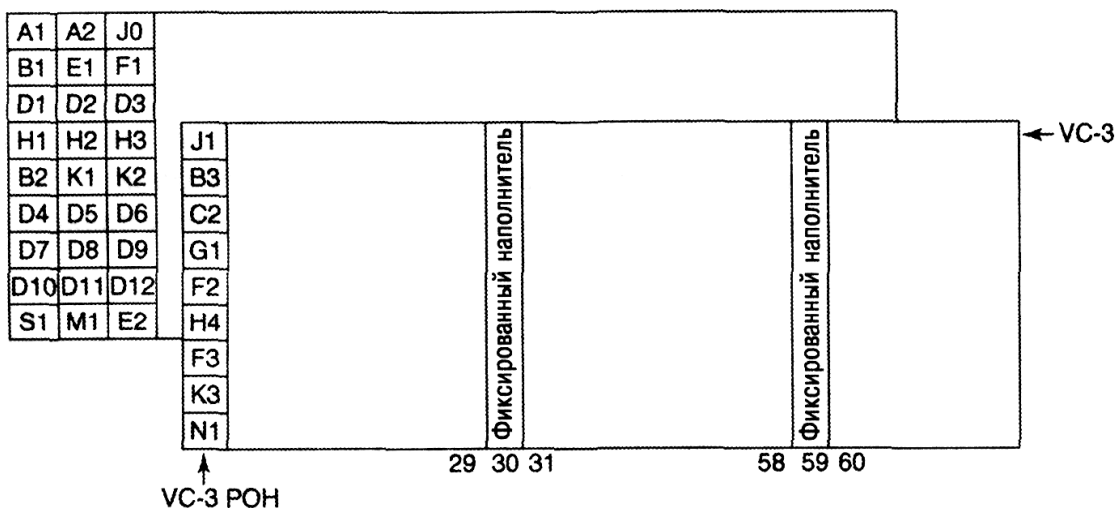


Рис. 9.30. Функциональная блок-схема скремблера синхронного фрейма. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 6-10, с. 17.)

9.3.5. Структура фрейма для интерфейса 51,84 Мбит/с

Системы передачи SDH малой и средней емкости, основанные на технологиях радиосвязи и спутниковой связи и не предназначенные для передачи сигналов STM-1, могут работать на скорости 51,84 Мбит/с в пределах цифровых секций. Однако эта скорость не отражена в виде уровня иерархии SDH (в литературе она, обычно, фигурирует как модуль STM-0), или как скорость интерфейса NN1 (см. [9.13]).

Рекомендованная структура фрейма (модуля STM-0) сигнала 51,840 Мбит/с для спутниковых систем (см. ITU-R S.1149) и РРЛ прямой видимости (см. ITU-R F.750) показана на рис. 9.31.



Замечания:

1. Позиция ячейки M1 не совпадает с позицией аналогичной ячейки (9, 3N + 3) в фрейме STM-N.
2. Столбец фиксированного наполнителя не является частью VC-3.)

Рис. 9.31. Структура фрейма (модуля STM-0) для операций на скорости 51,840 Мбит/с. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. А1, с. 89.)

9.3.6. Методы мультиплексирования SDH

9.3.6.1. Мультиплексирование административных блоков в STM-N

Мультиплексирование AUG в STM-N. Организация N групп AUG в модуль STM- N показана на рис. 9.32. Структура AUG - это матрица (9×261) плюс 9 байт в строке 4 (для указателя AU-4). STM- N состоит из SOH, описанного ниже, и структуры (типа матрицы) размера 9 строк и (N ×261) столбцов с указателем для AU- n размера N ×9 байт в строке 4. N групп AUG мультиплексируются по схеме с байт-интерливингом в эту структуру и имеют фиксированную привязку (фазу) по отношению к STM- N .

Мультиплексирование AU-4 в AUG. Организация мультиплексирования 1 блока AU-4 в группу модулей AUG показана на рис. 9.33. 9 байт в начале строки 4 предназначены для указателя AU-4. Оставшаяся матрица размера 9×261 занята под виртуальный контейнер VC-4. Фаза VC-4 не фиксирована по отношению к AU-4. Положение первого байта VC-4 по отношению к указателю AU-4 определяется значением указателя. Блок AU-4 помещается прямо в группу блоков AUG.

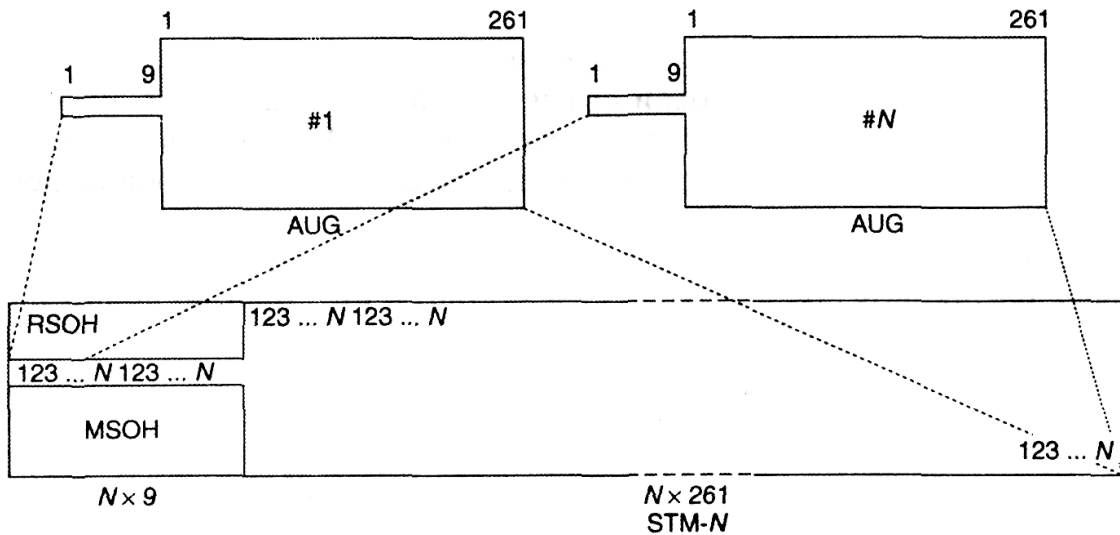


Рис. 9.32. Мультиплексирование N групп AUG в модуль STM- N (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 7-1, с. 18.)

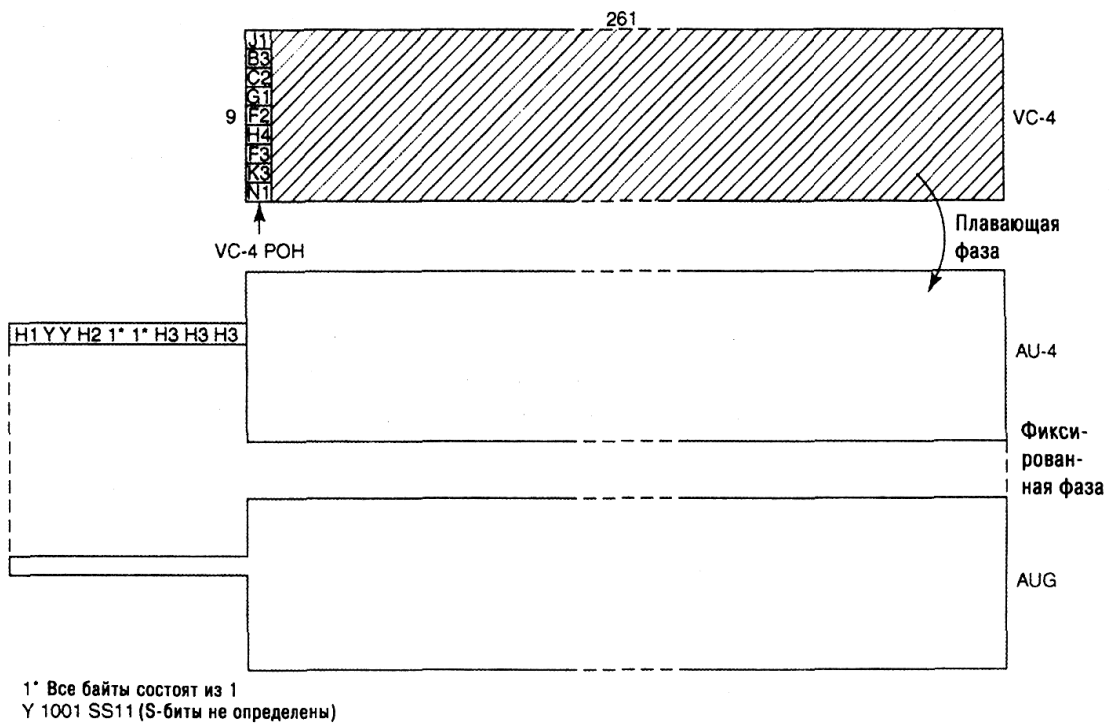


Рис. 9.33. Мультиплексирование блока AU-4 в группу модулей AUG. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 7-2, с. 19.)

Мультиплексирование AU-3 в AUG. Организация мультиплексирования 3 блоков AU-3 в группу модулей AUG показана на рис. 9.34. 3 байта в начале строки 4 предназначены для указателя AU-3. Оставшаяся матрица размера 9×87 занята под виртуальный контейнер VC-3 и

два столбца фиксированного наполнителя. Байты этих двух столбцов фиксированного наполнителя каждого AU-3 должны быть одинаковы. Фаза VC-3 и указанных столбцов фиксированного наполнителя не фиксирована по отношению к AU-3. Положение первого байта VC-3 по отношению к указателю AU-3 определяется значением указателя. Указанные три AU-3 мультиплексируются в AUG по схеме с байт-интерливингом.

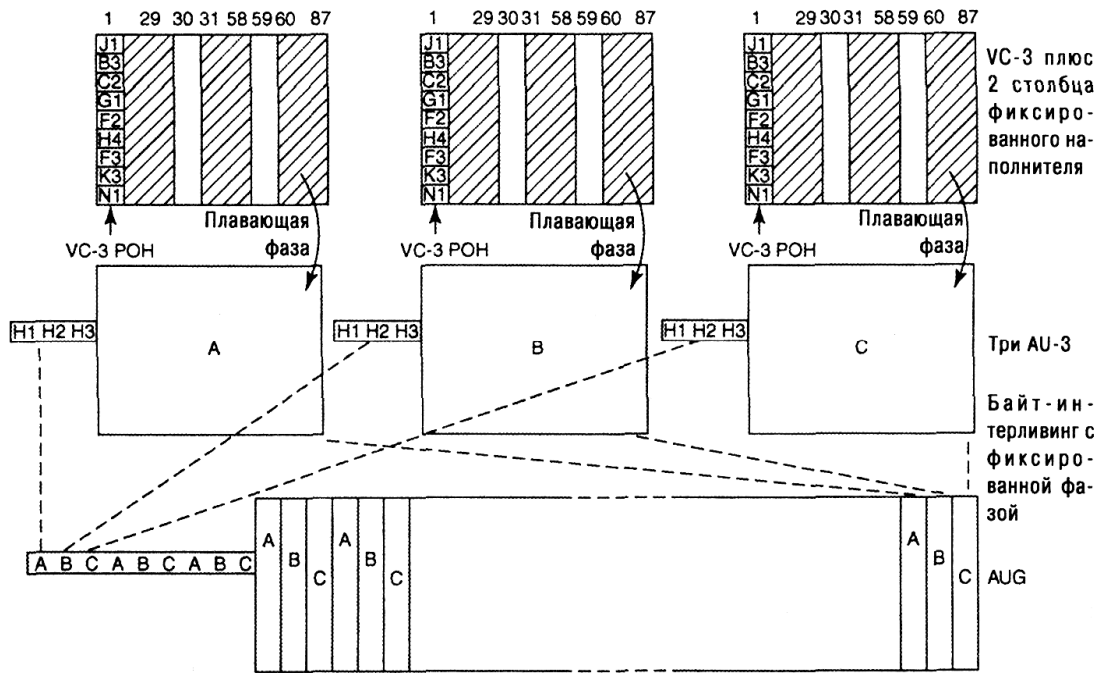


Рис. 9.34. Мультиплексирование блоков AU-3 в группу модулей AUG. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 7-3, с. 20.)

9.3.6.2. Мультиплексирование грибных блоков в VC-4 и VC-3

Мультиплексирование групп трибных блоков (TUG-3) в VC-4. Схема мультиплексирования 3 TUG-3 в VC-4 показана на рис. 9.35. TUG-3 - структура по типу матрицы размера 9×86 . VC-4 состоит из одного столбца VC-4 POH, двух столбцов фиксированного наполнителя и 258 столбцов полезной нагрузки. Три TUG-3 мультиплексируются по схеме с байт-интерливингом в поле полезной нагрузки VC-4 размера 9×258 и имеют фиксированную фазу по отношению к VC-4. Как описано в предыдущем подразделе по мультиплексированию AUG в STM-N, фаза VC-4 по отношению к AU-4 дается указателем AU-4.

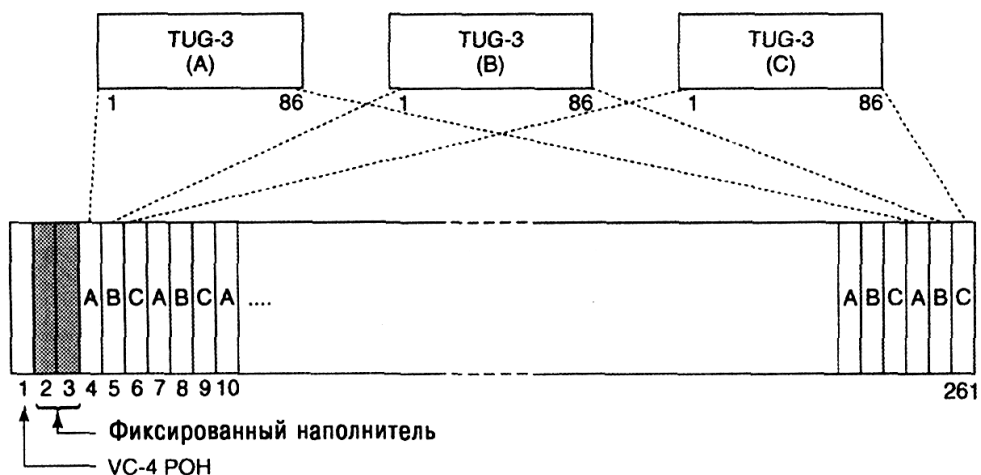


Рис. 9.35. Мультиплексирование трех групп TUG-3 в VC-4. (См. [9.13], ИТУ-T G.707, рис. 7-4, с. 21.)

Мультиплексирование TU-3 в TUG-3. Мультиплексирование одного блока TU-3 в TUG-3 показано на рис. 9.36. Блок TU-3 состоит из VC-3 с 9-байтным VC-3 POH и указателем TU-3. Первый столбец TUG-3 (представленного матрицей 9×86) предназначен для указателя TU-3 (байты H1, H2, H3) и (остаток) для фиксированного наполнителя. Фаза VC-3 по отношению к TUG-3 определяется указателем TU-3.

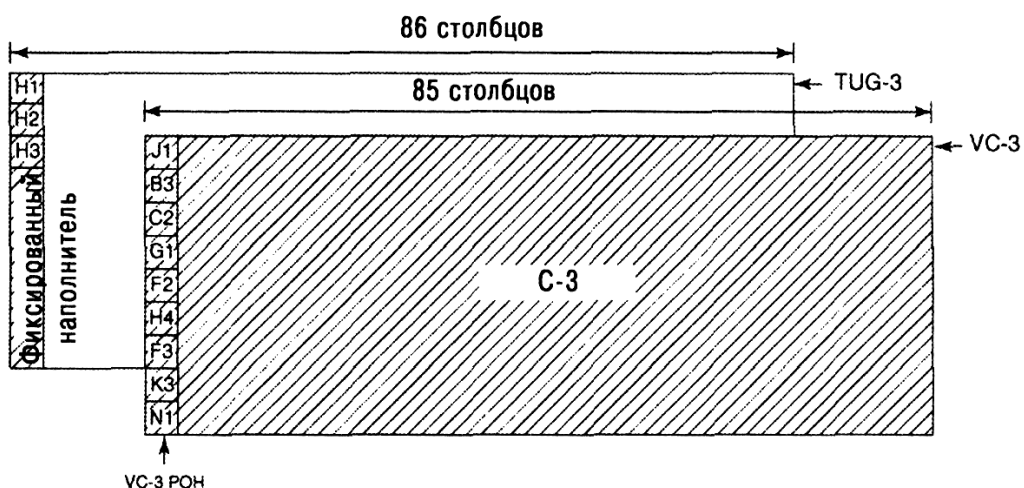


Рис. 9.36. Мультиплексирование одного блока TU-3 в TUG-3. (См. [9.13], ИТУ-T G.707, рис. 7-5, с. 21.)

Мультиплексирование TUG-2 в TUG-3. Схема мультиплексирования TUG-2 в TUG-3 приведена на рис. 9.37. Структура TUG-3 - матрица размера 9×86 , первые два столбца которой — фиксированные наполнители.

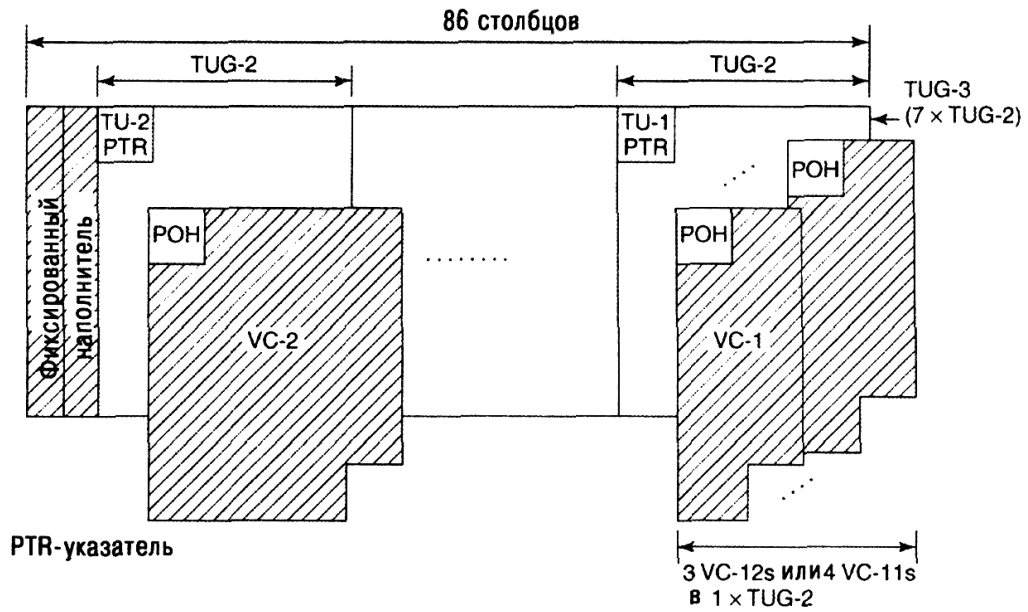


Рис. 9.37. Мультиплексирование группы блоков TUG-2 в TUG-3. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 7-6, с. 22.)

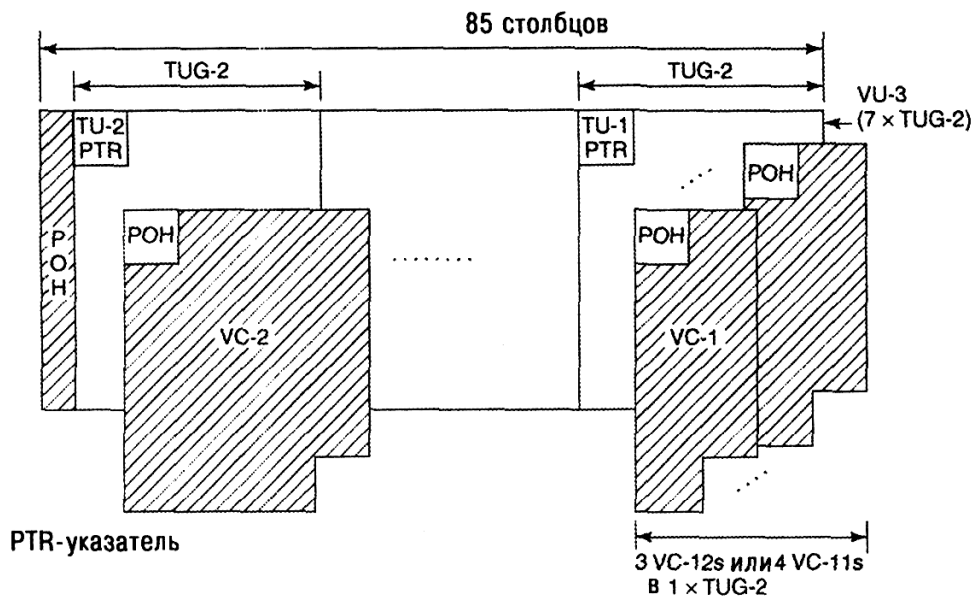


Рис. 9.38. Мультиплексирование группы блоков TUG-2 в VC-3. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 7-8, с. 24.)

Мультиплексирование TUG-2 в VC-3. Схема мультиплексирования TUG-2 в VC-3 приведена на рис. 9.38. Структура VC-3 - состоит из VC-3 POH и матрицы размера 9×84 в качестве полезной нагрузки. Группа из 7 TUG-2 может быть мультиплексирована в VC-3.

9.3.7. Указатели

9.3.7.1. Указатель AU-n

Указатель AU-n обеспечивает возможность гибкого и динамического выравнивания VC-n внутри фрейма AU-n. Динамическое выравнивание означает, что VC-n может плавать в фрейме AU-n. Следовательно, такой указатель позволяет приспособиться не только к разным фазам VC-n и SOH, но и к разности скоростей фреймов.

Расположение указателя AU-n. Указатель AU-4 содержится в байтах H1, H2 и H3, как показано на рис. 9.39. Три указателя разных AU-3 располагаются в трех разных наборах байт H1, H2 и H3, как показано на рис. 9.40.

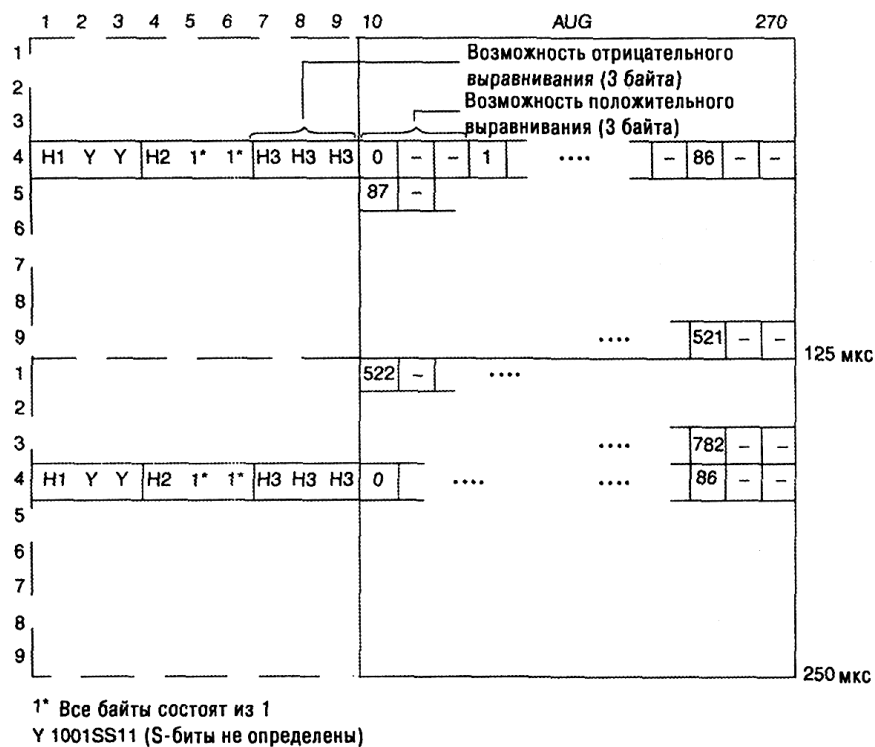


Рис. 9.39. Схема нумерации смещений указателя AU-4. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 8-1, с. 34.)

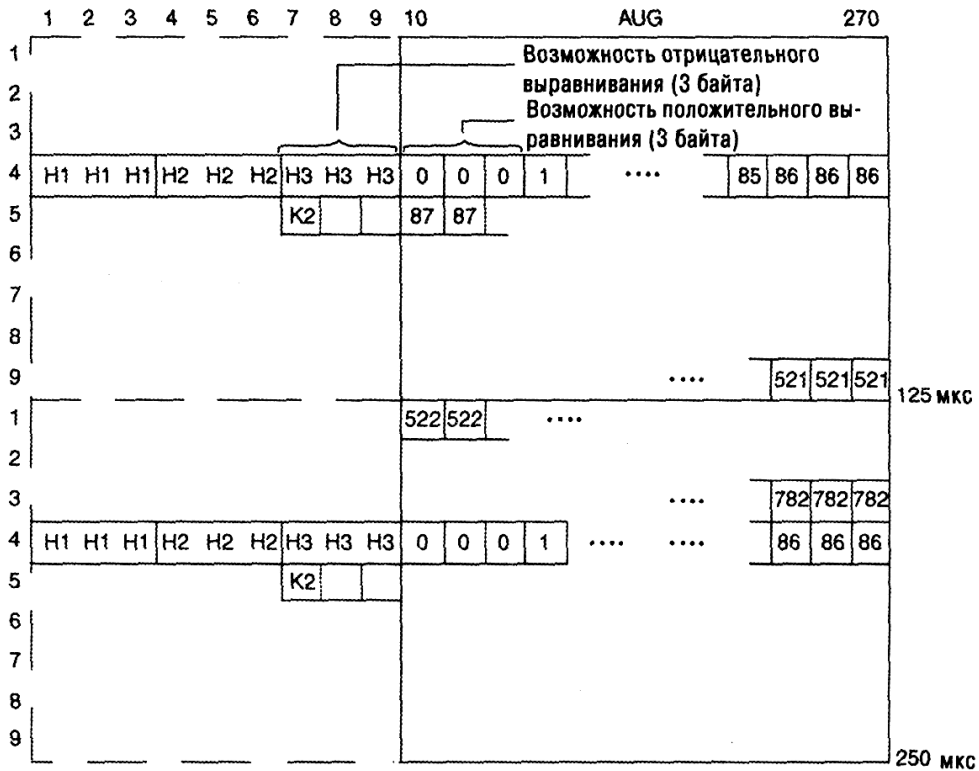


Рис. 9.40. Схема нумерации смещений указателя AU-3. (См. [9.13], ИТУ-T G.707, рис. 8-2, с. 35.)

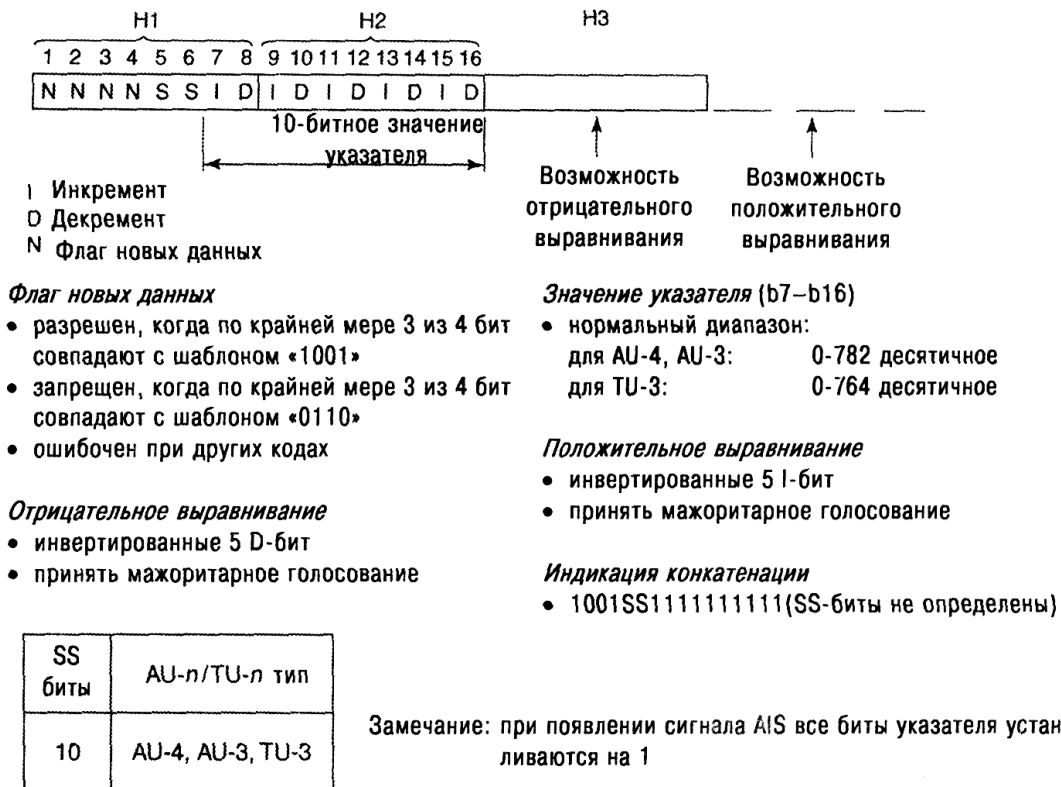


Рис. 9.41. Кодирование указателя AU-n/TU-3 (H1, H2, H3). (См. [9.13], ИТУ-T G.707, рис. 8-3, с. 36.)

Значение указателя AU-n. Указатель, содержащийся в H1 и H2, предназначен для определения позиции байта, где начинается VC-n. Эти два байта, отведенные для функции указателя, должны рассматриваться как одно слово, что иллюстрируется рис. 9.41. Последние 10 бит (биты с 7 по 16) этого слова указателя собственно и содержат значение указателя.

Как видно из рис. 9.41, значение указателя AU-4 является двоичным числом в диапазоне от 0 до 782, которое указывает смещение (с инкрементом в три байта) между этим указателем и первым байтом VC-4 (см. рис. 9.42). Рис. 9.41 также дает еще один дополнительный указатель — индикацию конкатенации. Она обозначается двоичным кодом 1001 в битах 1-4, при этом биты 5-6 не определены, а 10 бит (7-16) установлены на 1. Указатель AU-4 устанавливает индикацию конкатенации при наличии конкатенации для AU-4.

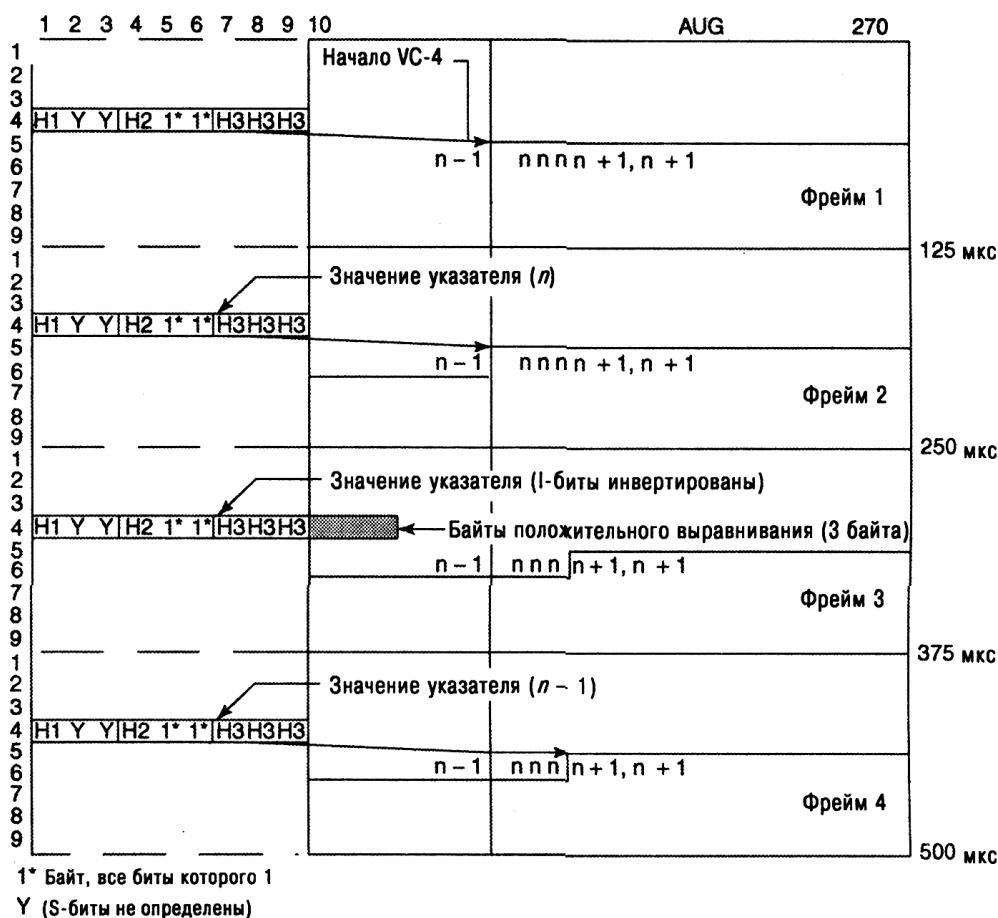


Рис. 9.42. Операции выравнивания указателя AU-4, положительное выравнивание. (См. [9.13], ITU-T G.707, рис. 8-3, с. 36.)

Как показано на рис. 9.41, значение указателя AU-3 — также двоичное число в диапазоне от 0 до 782. Так как существуют три AU-3 в группе AUG, то каждый имеет свои собственные наборы байт H1, H2 и H3.

Заметим, что байты H показаны на рис. 9.39 в виде последовательности. Первый набор H1, H2, H3 соответствует первому AU-3, второй - второму AU-3 и т.д., причем каждый указатель AU-3 функционирует независимо.

Во всех случаях, байты указателя AU-*n* не учитываются как смещение. Например, в AU-4, значение указателя 0 показывает, что VC-4 начинается с байта, следующего непосредственно за последним H3 байтом, тогда как смещение 87 указывает, что VC-4 начинается на три байта дальше, чем байт K2.

Частотное выравнивание. Если существует смещение по частоте между скоростями фреймов AUG и VC-*n*, то значение указателя будет увеличено или уменьшено, так, как это необходимо, и приведет к соответствующему положительному или отрицательному выравниванию на байт или байты. Последовательные операции с указателем должны быть отделены друг от друга по крайней мере тремя фреймами (т.е., могут начинаться каждый четвертый фрейм), в которых значение указателя остается постоянным. Если скорость VC-*n* слишком мала, по сравнению со скоростью AUG, тогда выравнивание VC-*n* должно периодически соскальзывать во времени вниз и значение указателя должно увеличиваться на 1. Индикатором этой операции является инвертирование бит 7, 9, 11, 13 и 15 (1-биты) слова указателя, которое запускает механизм 5-битного мажоритарного голосования на стороне приемника. В результате его срабатывания, три байта положительного выравнивания появляются сразу за байтом H3 в фрейме AU-4, содержащим инвертированные 1-биты. Последующие указатели будут содержать новое смещение. Это наглядно показано на рис. 9.42.

Для фреймов AU-3 байты положительного выравнивания появляются сразу за соответствующим байтом H3 фрейма AU-3, содержащего

инвертированные 1-биты. Последующие указатели будут содержать новые смещения.

Если скорость фрейма $VC-n$ слишком велика по сравнению со скоростью AUG, тогда выравнивание $VC-n$ должно периодически оказываться во времени впереди, и значение указателя должно уменьшаться на 1. Индикатором этой операции является инвертирование бит 8, 10, 12, 14 и 16 (D-биты) слова указателя, которое запускает механизм 5-битного мажоритарного голосования на стороне приемника. В результате его срабатывания, три байта отрицательного выравнивания появляются в байте N3 фрейма AU-4, содержащим инвертированные D-биты. Последующие указатели будут содержать новое смещение.

Генерация указателя. Ниже приведены следующие правила генерации указателя AU- n :

1. При нормальном функционировании, указатель позиционирует начало $VC-n$ внутри фрейма AU- n . Флаг новых данных NDF устанавливается равным 0110. NDF состоит из N -бит, биты 1-4 в слове указателя.

2. Значение указателя может быть изменено только при осуществлении операций 3, 4 или 5 (см. ниже).

3. Если требуется положительное выравнивание, текущее значение указателя посылается с инвертированными I-битами, и последующая возможность положительного выравнивания приводит к заполнению фиктивной информацией. Последующие указатели содержат значение предыдущего указателя увеличенное на 1. Если предыдущее значение является максимальным, то последующий указатель сбрасывается на 0. Вслед за этой операцией на протяжении трех фреймов не допускаются какие-то операции увеличения или уменьшения указателя.

4. Если требуется отрицательное выравнивание, текущее значение указателя посылается с инвертированными D-битами, и последующая возможность отрицательного выравнивания перезаписывается с фактическими данными. Последующие указатели содержат значение предыдущего

указателя, уменьшенное на единицу. После этой операции на протяжении трех фреймов не допускаются какие-то операции увеличения или уменьшения указателя.

5. Если выравнивание *VC-n* изменяется по причинам, отличным от указанных в п.3 и 4, то новое значение указателя должно быть послано вместе с установкой флага NDF на 1001. NDF появляется только в первом фрейме, который содержит эти новые значения. Новая позиция *VC-n* начинается с первой ячейки смещения, указанной новым указателем. После этой операции на протяжении трех фреймов не допускаются операции увеличения или уменьшения указателя.

Интерпретация указателя. Ниже приведены следующие правила интерпретации указателя *AU-n*:

1. При нормальном функционировании, указатель определяет начало *VC-n* внутри фрейма *AU-n*.

2. Любые вариации текущего значения указателя игнорируются до тех пор, пока не будет получено последовательно три раза непротиворечивое новое значение, или ему не будет предшествовать одно из правил 3, 4 или 5. Любое непротиворечивое новое значение, полученное последовательно три раза, имеет более высокий приоритет над теми, что следуют из правил 3 и 4

3. Если большинство I-бит в слове указателя инвертированы, указывается операция положительного выравнивания. Последующие значения указателя должны увеличиваться на 1.

4. Если большинство D-бит в слове указателя инвертированы, указывается операция отрицательного выравнивания. Последующие значения указателя должны уменьшаться на 1.

5. Если флаг NDF интерпретируется как «допустимая операция», совпадающее значение указателя должно быть заменено текущим при смещении, указанном новым значением указателя, до тех пор пока приемник не находится в состоянии, которое соответствует потере указателя.

9.4. Заключение

В табл. 9.3 приведена сводка параметров модулей полезной нагрузки и типов отображений в SONET/SDH. В табл. 9.4 приведен обзор заголовков для STM-1 и STM-3с в SDH.

Таблица 9.3

Сводка параметров модулей полезной нагрузки (PL) в SONET/ SDH

| Полезная нагрузка | SDH | | | | SONET | | | |
|-------------------|-----------|------------------------|------------|--------------------------------|-----------|------------------------|------------|-------------|
| | Контейнер | Фактическая емкость PL | PL или POH | Отображение AU-3 /AU-4 на базе | Контейнер | Фактическая емкость PL | PL или POH | Отображение |
| DS1 (1.544) | VC-11 | 1.648 | 1.728 | (AU-3), AU-4 | VT1.5 | 1.648 | 1.664 | STS-1 |
| E1 (2.048) | VC-12 | 2.224 | 2.304 | AU-3, AU-4 | VT2 | 2.224 | 2.240 | STS-1 |
| | VC-12 | 2.224 | 2.304 | (AU-3), AU-4 | | | | |
| DS1C (3.152) | | | | | VT3 | 3.376 | 3.392 | STS-1 |
| DS2 (6.312) | VC-2 | 6.832 | 6.912 | (AU-3), AU-4 | VT6 | 6.832 | 6.848 | STS-1 |
| E3 (34.368) | VC-3 | 48.384 | 48.960 | AU-3, AU4 | | | | |
| DS3 (44.736) | VC-3 | 48.384 | 48.960 | (AU-3), AU-4 | STS-1 | 49.536 | 50.112 | STS-1 |
| E4 (139.264) | VC-4 | 149.760 | 150.336 | (AU-4) | STS-3C | 149.760 | 150.336 | STS-3C |
| ATM (149.760) | VC-4 | 149.760 | 150.336 | (AU-4) | STS-3C | 149.760 | 150.336 | STS-3C |
| ATM (599.040) | VC-4-4C | 599.040 | 601.344 | (AU-4) | STS-12c | 599.040 | 601.344 | STS-12c |
| FDDI (125.000) | VC4 | 149.760 | 150.336 | (AU-4) | STS-3c | 149.760 | 150.336 | STS-3c |
| DQDB (149.760) | VC-4 | 149.760 | 150.336 | (AU-4) | STS-3C | 149.760 | 150.336 | STS-3c |

Примечание. числа имеют размерность Мбит/с

Источник. Напечатано с разрешения IEEE Press [9.3], Табл. 2, с. 64

Таблица 9.4

Сводка ячеек заголовков для STM-1 и STM-3с.

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|----|----------------------|
| A1 | A1 | A1 | A2 | A2 | A2 | C1 | C1a | C1 | | J1 | трассировка |
| B1 | | | | | | F1 | | | | B3 | |
| D1 | | | | | | D3 | | | | C2 | метка сигнала |
| H1 | H1a | H1a | H2 | H2a | H2a | H3 | H3 | H3 | | G1 | маршрутный заголовок |
| B2 | B2 | B2 | K1 | | | K2 | | | | F2 | |
| D4 | | | D5 | | | D6 | | | | H4 | мультифрейм |
| D7 | | | D8 | | | D9 | | | | Z3 | |
| D10 | | | D11 | | | D12 | | | | Z4 | |
| Z1 | Z1 | Z1 | Z2 | Z2 | Z2 | E2 | | | | Z5 | |

A1, A2 — фрейминг 9 (опорная синхро-последовательность)

B1, B2, B3 - ВР-8 (проверка на четность)

C1 - STS-1 ID, C1a - только для STS-3c

D1 - D12 - канал передачи данных

E1, E2 — канал служебной связи

F1, F2 - для нужд пользователя

H1, H2 - значение указателя, H1a - 1001ss11, H2a - 11111111, H3 - зона действия указателя

K1, K2 - APS (автоматическое защитное переключение)

Z1 — Z5 — для последующего применения.

ГЛАВА 10 СОЕДИНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ИНЖЕНЕРНОМ УРОВНЕ

10.1. Понятие бюджета линии связи

Вычисление бюджета линии связи на ВОЛС очень похоже на вычисление бюджета линии РРЛ, линии тропосферной связи или спутниковой линии на случай потери сигнала (LOS), выполняемого инженером проектировщиком. При его расчете на практике приходится определять такие параметры линии, как:

- выходную мощность источника света;
- потери в волокне;
- потери от оптических разъемов, сростков, соединительных шнуров;
- дополнительные потери мощности (см. разд. 4.5)
- допуски.

Значение порога детектора в дБм основано на желаемом уровне ошибок ВЕК. Дополнительно к этому нам, наверное, понадобятся:

- усиление оптических усилителей;
- потери фильтров;
- пассивные потери WDM (см. [10.11]);
- потери разветвителей;
- потери изоляторов.

При расчете бюджета линии передачи используются, почти исключительно, децибелы.

Проектирование линии основано на расчете его бюджета. Либо мы присваиваем значение тем параметрам, что перечислены выше, либо мы вычисляем некоторые специфические значения. Цель состоит в том, чтобы иметь наиболее эффективный (по цене) проект, способный удовлетворить нашим требованиям.

Один из первых шагов в выполнении упражнений по оценки бюджета линии передачи состоит в определении того, является ли рассматриваемая линия ограниченной по дисперсии или по потерям. В общем случае, если используется волокно типа G.653 [10.1], или LEAF компании Corning, линия будет ограниченной по потерям вплоть до скорости передачи 1 Гбит/с (фактически до 2,5 Гбит/с - STM-16). Одно из отличий бюджета ВОСП от бюджета радио/беспроводных систем в *бюджете времени нарастания*. На конечном шаге определяется факт того, является ли линия ограниченной по дисперсии. Бюджет также дает нам сведения о том, что можно с этим сделать. В первой части этой главы, мы имеем дело с бюджетами по мощности, где линия рассматривается ограниченной по мощности. В разделе 10.4 мы рассматриваем проблемы, связанные с дисперсией, вычисляя скорость нарастания в системе, в которой нам заданы (или же мы оцениваем) скорости нарастания элементов системы.

10.2. Расчетные допуски для линии связи

Расчетные допуски для линии связи можно определить как те дополнительные децибелы, которые добавляются к бюджету линии в качестве *допуска безопасности*. Было бы не плохо иметь такой допуск безопасности, чтобы компенсировать возможность недооценки нами дополнительных непредвиденных потерь линии; ведь мы рассчитываем по минимуму, чтобы сэкономить деньги. Некоторые активные элементы имеют тенденцию ухудшения характеристик со временем (например, СИД). Не все сростки имеют одинаково малые потери. Допуски для линии связи призваны компенсировать все эти недостатки. Мы рекомендуем иметь суммарный допуск на уровне 6 дБ для очень длинных систем. Каждый децибел стоит денег производителю системы. Многие из них ограничивают величину суммарного допуска до 4,8 дБ и даже 3 дБ. Мы призываем противиться

этому.

ITU-T в рекомендации G.957 предписывает выделять в бюджете 2-4 дБ для покрытия потерь оборудования в конце срока службы. Следует заметить, что специалисты по надежности (см. Telcordia GR-468-CORE [10.3] и TR-NWT-000357 [10.4]) выделяют три периода в сроке службы оборудования:

1. Детский, где мы ожидаем «детскую смертность».
2. Нормального функционирования, где оборудование удовлетворяет характеристикам и требованиям надежности.
3. Конец срока службы, где оборудование начинает изнашиваться и мы уже не можем ожидать, что оно будет удовлетворять характеристикам и требованиям надежности.

Кто-то предполагает увидеть в скобках замечание относительно деградации оборудования в конце срока жизни, например, такое, что в любом случае оборудование, которое морально устарело, должно быть заменено независимо от конца его срока службы.

Рекомендация ITU-T G.957 [10.2] утверждает:

«Спецификации по затуханию даются в расчете на худший случай, включающий потери на сростки, оптические разъемы и аттенюаторы (если используются) или другие пассивные оптические устройства, и другие дополнительные допуски на кабель, выбираемые для того, чтобы покрыть возможные потери от:

- (1) последующей модификации конфигурации кабельной прокладки (дополнительные сростки, увеличение длины кабеля и т. д.;
- (2) вариации характеристик кабеля в зависимости от влияния факторов окружающей среды;
- (3) деградации любых оптических разъемов и аттенюаторов (если используются) или других пассивных оптических устройств между точками S и R, если они указываются.

Рекомендация ITU-T G.957 определяет точку S, как точку на оптическом волокне сразу за оптическим разъемом передатчика (C_{TX}), а

точку R, как опорную точку на оптическом волокне сразу перед оптическим разъемом приемника (C_{RX}). Эти опорные точки ITU-T для системы показаны на рис. 10.1.

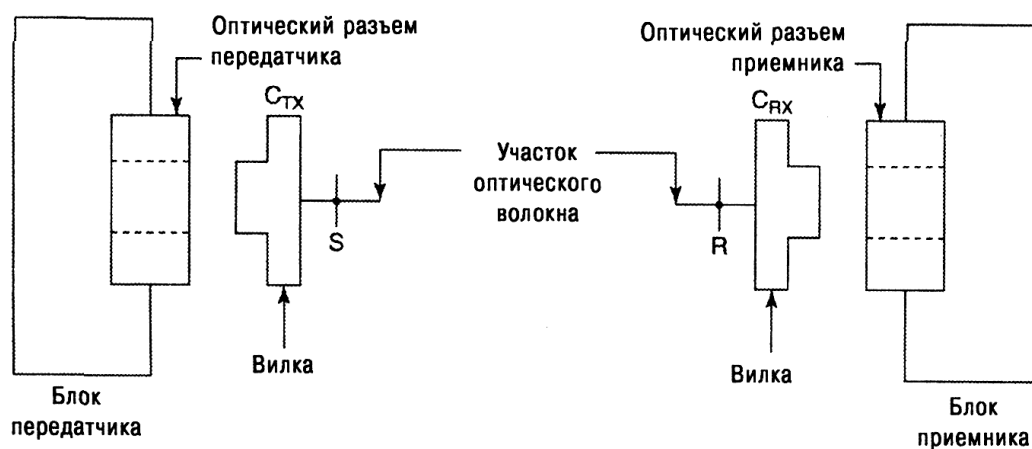


Рис. 10.1. Схема эталонной оптоволоконной линии, показывающая положение опорных точек S (передача) и R (прием) и оптических разъемов, идентифицируемых как C_{TX} и C_{RX} . (См. ITU-T G.957 [10.2], рис.1, с.8)

Рекомендации ITU-T определяют три типа оптоволоконных секций (стандартных линий), основываясь на их длине, как показано в табл. 10.1.

10.2.1. Таблицы контроля

Таблицы 10.2 — 10.4 приведены здесь для того, чтобы читатель имел возможность сопоставить их с теми значениями, которые он получил в процессе подготовки бюджета для какого-то проекта. Эти (достаточно консервативные) значения взяты из таблиц в рекомендациях ITU-T G.957 [10.2], табл. 2-4. Например, средняя излучаемая мощность для столбца 6 может быть +3 или +6 дБм; а с оптическим усилителем эта мощность может достичь +20 дБм или больше, в зависимости от обстоятельств.

Тестовые звенья ITU-T, на основании результатов которых были получены данные в таблицах 2-4 рекомендации G.957, использовали двоичное (NRZ) оптическое линейное кодирование, скремблирование и, следовательно, удовлетворяли требованиям рекомендации ITU-T G.707. (См. раздел 4.7 в тексте.)

Типы секций (стандартных линий), расстояния, длины волн и допуски

| Тип | Внутри-офисный | Короткая секция (1) | Короткая секция (2) | Длинная секция (1) | Длинная секция (2) | Длинная секция (3) |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Длина волны | 1310 нм | 1310 нм | 1550 нм | 1310 нм | 1550 нм | 1550 нм |
| Тип волокна | ОМ | ОМ | ОМ | ОМ | ОМ со сдвигом отсечки | ОМ со сдвигом дисперсии |
| Расстояние, км | ≤ 2 | ~ 15 | ~ 15 | ~ 40 | ~ 80 | ~ 80 |
| Код использования ^{а)} | 1-1 | S-1.1 | S-1.2 | L-1.1 | L-1.2 | L-1.3 |
| Порог ^{б)} 155 Мбит/с, дБм | -23 ^{в)} | -28 | -28 | -28 | -28 | -28 |
| Порог ^{б)} 622 Мбит/с, дБм | -23 | -28 | -28 | -28 | -28 | -28 |
| Порог ^{б)} 2,5 Гбит/с, дБм | -18 | -18 | -18 | -27 | -28 | -28 |
| Диапазон ослабления, дБ | 0-7 | 0-12 | 0-12 | 10-28 | 10-28 | 10-28 |
| Допуск приемника, дБ | 3 | 3 | 3 | 4 | 4,8 | 4,8 |

^{а)} ITU-T код типового использования, см. G.957 и G.662.

^{б)} *Порог* относится к порогу детектора в опорной точке R. Этот порог устанавливается для BER = 10⁻¹⁰. Для BER = 10⁻¹² этот порог будет на 1 дБ менее чувствительным, алгебраически это означает добавление 1 дБ. Таким образом, исходный порог -23 дБ становится порогом -22 дБ.

^{в)} Требуется аттенюатора или источника с укороченным диапазоном действия, чтобы избежать перегрузки приемника.

Источники. См. ITU-T G.957 [10.2], табл.2-4, с.8 и [10.5].

Мы подчеркиваем, что выбор типа линейного кодирования — важная часть процесса проектирования оптоволоконной линии. Если мы озабочены тем, чтобы восстановить сигнал синхронизации, мы возможно выберем режим кодирования RZ. Если же мы стремимся к минимизации числа переходов состояния на такой линии, то нашим выбором был бы режим NRZ.

Таблица 10.2

Примеры бюджетов оптических линий для оптического интерфейса STM-1 SDH (155 Мбит/с)

| Номинальная скорость сигнала, Мбит/с | Значения | | | | | | | | | | |
|---|--|----|---------------------------|------------|-----------|-------|---------------------------|-------|------------|------------------------|-----------|
| | 155,520 - STM-1 в соответствии с рекомендацией G.707 | | | | | | | | | | |
| Код использования (табл. 10.1) | 1-1 | | S-1.1 | S-1.2 | | L-1.1 | | L-1.2 | L-1.3 | | |
| Рабочий диапазон длин волн, нм | 1260 ^{a)} - 1360 | | 1261 ^{a)} - 1360 | 1430- 1576 | 1430-1580 | | 1263 ^{a)} - 1360 | | 1480- 1580 | 1534-1566 1523-1577 | 1480-1580 |
| Передатчик в опорной точке S | MLM LED | | MLM | MLM | SLM | | MLM SLM | SLM | MLM | SLM | |
| Тип источника | MLM LED | | MLM | MLM | SLM | | MLM SLM | SLM | MLM | SLM | |
| Спектральные характеристики: | | | | | | | | | | | |
| максим, ширина (СКВ), нм | 40 | 80 | 7,7 | 2,5 | — | | 3 | — | — | 3/2,5 | — |
| максим, ширина (-20 дБ), нм | — | — | — | — | 1 | | — | 1 | 1 | — | 1 |
| миним. подавление боковых лепестков, дБ | — | — | — | — | 30 | | — | 30 | 30 | — | 30 |
| Средняя излучаемая мощность: | | | | | | | | | | | |
| максимум, дБм | -8 | | -8 | -8 | -8 | | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| минимум, дБм | -15 | | -15 | -15 | -15 | | -5 | -5 | -5 | -5 | |
| Миним. коэффициент ослабления сигнала, дБ | 8,2 | | 8,2 | 8,2 | 8,2 | | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| Оптический путь между S и R | | | | | | | | | | | |
| Диапазон ослабления ^{б)} , дБ | 0-7 | | 0-12 | 0-12 | н.д. | | 10-28 | 10-28 | 10-28 | 10-28 | |
| Максим, дисперсия, пс/нм | 18 | 25 | 96 | 296 | н.д. | | 246 | н.д. | н.д. | 246/296 | н.д. |
| Миним. возвратные потери кабельного участка в точке S, включая оптические разъемы, дБ | н.д. | | н.д. | н.д. | н.д. | | н.д. | 20 | н.д. | н.д. | |
| Максим, отражение между S и R, дБ | н.д. | | н.д. | н.д. | н.д. | | н.д. | -25 | н.д. | н.д. | |
| Приемник в опорной точке R | | | | | | | | | | | |
| Минимум чувствительности ^{б)} , дБм | -23 | | -28 | -28 | -28 | | -34 | -34 | -34 | -34 | |
| Минимум перегрузки, дБм | -8 | | -8 | -8 | -8 | | -10 | -10 | -10 | -10 | |
| Максим, оптические потери, дБ | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Максим, отражение приемника, измеренное в точке R, дБ | н.д. | | н.д. | н.д. | н.д. | | н.д. | -25 | н.д. | н.д. | |

^{a)} Некоторые администрации могут устанавливать предел 1270 нм.

^{б)} См. статью 6 основного документа.

Источник: См. ITU-T G.957 [10.2], табл.2, с.5

Таблица 10.3

Примеры бюджетов оптических линий для оптического интерфейса STM-4 SDH (622 Мбит/с)

| Номинальная скорость сигнала, Мбит/с | Значения | | | | | | |
|---|--|---|--------------|-------------------------|---------------|-------------------|------------|
| | 622,080 - STM-4 в соответствии с рекомендацией G.707 | | | | | | |
| Код использования (табл. 10.1) | I-4 | S-4.1 | S-4.2 | L-4.1 | | L-4.2 | L-4.3 |
| Рабочий диапазон волн, нм | 1261 ^{а)} -1360 | 1293 ^{а)} - 1334/ 1274-1356 | 1430-1580 | 1300-1325/ 1296-1330 | 1280-1335 | 1480-1580 | 1480-1580 |
| Передатчик в опорной точке S Тип источника | MLM LED | MLM | SLM | MLM | SLM | SLM | SLM |
| Спектральные характеристики: максим, ширина (СКВ), нм | 14,5 35 | 4/2,5 | — | 2,0/1,7 | — | — | — |
| максим, ширина (-20 дБ), нм | — — | — | 1 | — | 1 | < 1 ^{б)} | 1 |
| миним. подавление боковых лепестков, дБ | — — | — | 30 | — | 30 | 30 | 30 |
| Средняя излучаемая мощность: максимум, дБм | — -8 | -8 | -8 | — | +2 | +2 | +2 |
| минимум, дБм | — -15 | -15 | -15 | — | -3 | -3 | -3 |
| Миним. коэффициент ослабления сигнала, дБ | — 8,2 | 8,2 | 8,2 | — | 10 | 10 | 10 |
| Оптический путь между S и R Диапазон ослабления ^{в)} , дБ | 13 0-7 14 | 0-12 46/74 с | 0-12 н.д. | 10-24 92/109 н.д. | 10-24 н.д. | 10-24 б) | 10-24 — |
| Миним. возвратные потери кабельного участка в точке S, включая оптические разъемы, дБ | — н.д. | н.д. | 24 | — | 20 | 24 | 20 |
| Максим, отражение между S и R, дБ | — н.д. | н.д. | -27 | — | -25 | -27 | -25 |
| Приемник в опорной точке R Минимум чувствительности ^{б)} , дБм | — -23 | -28 | -28 | — | -28 | -28 | -28 |
| Минимум перегрузки, дБм | — -8 | -8 | -8 | — | -8 | -8 | -8 |
| Максим, оптические потери, дБ | — 1 | 1 | 1 | — | 1 | 1 | 1 |
| Максим, отражение измеренное в точке R, дБ | — н.д. | н.д. | -27 | — | -14 | -27 | -14 |

^{а)} Некоторые администрации могут устанавливать предел 1270 нм.

^{б)} См. статью 6.2.2 основного документа.

^{в)} См. статью 6 основного документа.

Источник: См. ITU-T G.957 [10.2], табл. 3, с. 6.

Примеры бюджетов оптических линий для оптического интерфейса STM-16
SDH (2,5 Гбит/с).

| | Значения | | | | | |
|---|---|------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
| | 2,488,320 — STM-16 в соответствии с рекомендацией G.707 | | | | | |
| Номинальная скорость сигнала, Мбит/с | | | | | | |
| Код использования (табл. 10.1) | I-16 | S-16.1 | S-16.2 | L-16.1 | L-16.2 | L-16.3 |
| Рабочий диапазон волн, нм | 1266 ^{а)} - 1360 | 1260 ^{а)} - 1360 | 1430- 1580 | 1280- 1335 | 1500- 1580 | 1500- 1580 |
| Передатчик в опорной точке S Тип источника | MLM | SLM | SLM | SLM | SLM | SLM |
| Спектральные характеристики: максим, ширина (СКВ), нм | 4 | — | — | — | — | — |
| максим, ширина (-20 дБ), нм | — | 1 | < 1 ^{б)} | 1 | < 1 ^{б)} | < 1 ^{б)} |
| миним. подавление боковых лепестков, дБ | - | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Средняя излучаемая мощность: максимум, дБм | -3 | 0 | 0 | +3 | +3 | +3 |
| минимум, дБм | -10 | -5 | -5 | -2 | -2 | -2 |
| Миним. коэффициент ослабления сигнала, дБ | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,2 | 8,2 |
| Оптический путь между S и R Диапазон ослабления ^{в)} , дБ | 0-7 | 0-12 | 0-12 | 10-24 ^{д)} | 10-24 ^{д)} | 10-24 ^{д)} |
| Максим, дисперсия, пс/нм | 12 | н.д. | б) | н.д. | 1200- 1600 ^{б),г)} | 10-24 |
| Миним. возвратные потери кабельного участка в точке S, включая оптические разъемы, дБ | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Максим, отражение между S и R, дБ | -27 | -27 | -27 | -27 | -27 | -27 |
| Приемник в опорной точке R Минимум чувствительности ^{б)} , дБм | -18 | -18 | -18 | -27 | -28 | -27 |
| Минимум перегрузки, дБм | -3 | 0 | 0 | -9 | -9 | -9 |
| Максимальные оптические потери, дБ | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Максимальное отражение приемника, измеренное в точке R, дБ | -27 | -27 | -27 | -27 | -27 | -27 |

а) Некоторые администрации могут устанавливать предел 1270 нм.

б) См. статью 6.2.2 основного документа.

в) См. статью 6 основного документа.

г) Указанный диапазон дисперсий соответствует приблизительно (в расчете на худший случай) значению дисперсии 80-км участка волокна G.652/G.654 в диапазоне 1500-1580 нм: производители должны дать достаточный допуск, чтобы гарантировать надлежащую работу линии на расстоянии 80 км.

д) Чтобы удовлетворить 10 дБ минимальному ослаблению вместо 12 дБ ослабления, потребуется уменьшить максимальную выходную мощность, увеличить минимальную перегрузку, использовать оптические аттенуаторы, или воспользоваться комбинацией указанных решений.

Источник. См. ITU-T G.957 [10.2], табл. 4, с. 7.

Большинство систем используют кодирование типа NRZ или, возможно, манчестерское кодирование. Системы, использующие кодирование RZ, требуют большей полосы пропускания, чем системы с NRZ, что может быть существенным недостатком.

10.2.2. Практические таблицы ITU-T (МСЭ)

Таблица 10.2 дает параметры так, как они специфицированы ITU-T для оптического интерфейса STM-1 (155 Мбит/с). Таблица 10.3 аналогична табл. 10.2, но применима для оптического интерфейса STM-4 (622 Мбит/с). Таблица 10.4 приводит данные для оптического интерфейса STM-16 (2,488 Гбит/с). Заметим, что *STM-*n** — это номенклатура технологии SDH, которая обсуждается в гл.12.

10.3. Бюджет линии связи: примеры

Исходной информацией для этих примеров служат либо данные табл. 10.1, либо информация, приведенная в гл. 4, 5 и 6.

10.3.1. Общие правила

Начальным этапом в каждом случае является детектор света или приемник на удаленном конце. Изготовитель приемного оборудования обычно дает в технической документации один или несколько пороговых уровней. Еще более ценным для инженера проектировщика было бы иметь семейство кривых чувствительности, обычно по одной кривой для каждой стандартной скорости. Каждая кривая представляет собой график зависимости ВЕК от входного уровня у приемника, выраженного в — дБм. Ожидается, что указанные стандартные скорости являются скоростями либо SONET, либо SDH. (См. табл. 9.3.)

Таблица 10.1 обеспечивает пороги для BER порядка 10^{-10} для STS-

3/STM-1, STS-12/STM-4 и STS-48/STM-16. Они были взяты из табл. 2-4 рекомендации ITU-T G.957 [10.2]. Мы считаем, что эти пороговые уровни достаточно традиционны.

10.3.2. Пример 1

Допустим, что мы хотим установить ВОСП длиной 100 км, работающую на скорости 155 Мбит/с (STS-3/STM-1), удовлетворяющую требованиям к характеристикам, соответствующим G.826 [10.6]. По длине линии не предполагается использовать регенераторы или усилители. Выбираем оптическое волокно, которое мы хотели бы использовать, и длину волны передачи. Используем пороговое значение и необходимые допуски из табл. 10.1.

10.3.2.1. Анализ

Допустим, что мы будем использовать одномодовое волокно и длину волны в окне прозрачности 1550 нм. Фактически, 1550 нм — точка минимальных потерь для одномодового волокна типа G. 654 [10.7]. Убеждаемся, что линия принадлежит к классу ограниченных по потерям. Используем величину потерь 0,25 дБ/км, как предлагается в гл. 6, табл. 6.3. Предположим, что каждые 2 км имеются срезки с уровнем вносимых потерь 0,03 дБ; существуют оптические разъемы на самом конце кабеля с каждой стороны (опорные точки S и R), с уровнем вносимых потерь 0,5 дБ на каждый разъем (всего 1,0 дБ). На данной линии существуют дополнительные потери 1,0 дБ, вызванные дисперсией. Предположим, что средняя, излучаемая лазером MLM, мощность равна 10 дБм.

Пусть порог детектора света задан на уровне —28 дБм, а выходная мощность лазерного источника на ближнем конце — 0 дБм, тогда линия может допустить потери на уровне 28 дБ. (Нужно сделать следующее замечание. Порог -28 дБм по табл. 2-4, ITU-T G.957, соответствует BER = 10^{-10} ; можно было бы добавить 1 дБ, чтобы удовлетворить требованиям для

достижения $BER=10^{-12}$. Однако мы полагаем, что значение -28 дБм будет достаточным для достижения этого последнего значения BER. См. разд. 5.5.3 и табл. 5.2 в этом тексте. Большинство PIN-диодных детекторов работают в диапазоне -33 – -38 дБм для достижения желаемого BER при заданной скорости.) Предположим следующие уровни потерь:

| | |
|---|---|
| - потери в оптическом разъеме | 1,0 дБ; |
| - потери в волокне и сращениях | 25,0 дБ ($100 \text{ км} \times 0,25 \text{ дБ/км} = 25,0 \text{ дБ}$); |
| - потери мощности, вызванные дисперсией | 1,0 дБ. |
| Итого: | 27 дБ. |

В результате получаем запас по мощности только 1 дБ. Считаем, что этого запаса не достаточно.

Однако, разд. 6.4 рекомендации ITU-T G.957 устанавливает значения чувствительности, приведенные в табл. 2-4, в расчете на худший случай, в конце срока службы. Это дает еще примерно 2 дБ дополнительного запаса мощности до тех пор, пока не достигнут период окончания срока службы. При наступлении этого периода можно ожидать, что такая линия начнет демонстрировать ухудшение своих характеристик.

В этом случае рекомендуется, чтобы проектировщик линии передачи четко представлял, к какому классу относится используемый световой детектор: PIN-приемника или APD-приемника. Вернемся к табл. 5.2. PIN-приемник компании Alcatel имеет порог -35 дБм для $BER=10^{-10}$. Если мы собираемся использовать это значение и предполагаем, что оно должно быть номинальным, добавим еще +3 дБ в расчете на ухудшение характеристик в конце срока службы; примем 4 дБ в качестве дополнительного запаса мощности (т.е. значение -28 дБм в таблицах 2-4 рекомендации G.957 и значение -35 дБм — опубликованное значение характеристики PIN-приемника компании Alcatel для заданной скорости и уровне BER).

Мы предлагаем представить значения, которые здесь обсуждались, в

табличной форме, так, как это можно было бы ожидать, формируя бюджет линии. В этой таблице должны быть три колонки. Колонка 1 — Параметр или логический объект, колонка 2 — Значение, колонка 3 — Комментарий, где проектировщик мог бы написать комментарий или дать какой-то совет. Мы будем называть такую таблицу Расчетной таблицей 10.5.

Расчетная таблица 10.5

| Параметр или логический объект | Значение | Комментарий или совет |
|---|----------|---|
| Выходная мощность источника света | 0 дБм | Как правило, используются СИД передатчики, линия с ограничением по потерям |
| Световой детектор: порог приемника | -35 дБм | PIN-диодный приемник компании Alcatel |
| Бюджет линии | 35 дБ | Децибелы вычитаются алгебраически |
| Потери линии: Потери оптических разъемов | 1,0 дБ | По 0,5 дБ вносимых потерь на каждом конце в опорных точках S и R Волокно типа ITU-T G.654, длина волны 1550 нм Включая запас по мощности Излишний запас используется для неучтенного допуска на длину кабеля, обычно добавляют 5% для покрытия этого допуска ^{a)} |
| Потери в волокне (0,25 дБ/км) на длине 100 км | 25 дБ | |
| Дополнительные потери от дисперсии | 1,0 дБ | |
| Запас по мощности | 4,8 дБ | |
| Общие потери линии | 31,8 дБ | |
| Излишний запас по мощности | 3,2 дБ | |

10.3.3. Пример 2

Допустим, что длина трассы 160 км, а скорость передачи - 622 Мбит/с и не предполагается использовать регенераторы или усилители. Однако мощный усилитель (бустер) может быть встроен в источник света, а предусилитель - в приемник на удаленном конце. Эти усилители основаны на волоконно-оптическом усилении (EDFA) и работают в окне 1550 нм. Они имеют (каждый) усиление на уровне 17 дБ. Другими словами, мы

рассчитываем, что лазерный передатчик имеет выход 0 дБм, который затем будет усилен до величины +17 дБм, благодаря включению усилителя EDFA. Четырехволновое смешение не окажет какого-то влияния, учитывая, что используется только одна несущая. Приемник имеет порог —28дБм (табл. 10.1) для работы со скоростью 622 Мбит/с. Наличие усиления за счет EDFA (17 дБ) снижает порог до величины —45 дБм. Вычитая —45 дБм из +17дБм, получаем бюджет для линии передачи в 62 дБ. Мы можем теперь перейти непосредственно к табличным вычислениям, см. табл. 10.6.

Расчетная таблица 10.6

| Параметр или логический объект | Значение | Комментарий или совет |
|--|----------|---|
| Выходная мощность источника - лазерного диода SLM с EDFA | + 17дБм | Используется мощный усилитель типа EDFA |
| Световой детектор: порог приемника с усилителем EDFA | -45 дБм | |
| Бюджет линии | 62 дБ | |
| Потери линии: | | |
| Потери оптических разъемов | 2.0 дБ | 4 оптических разъема 5% длины добавляется для учета «лишнего» кабеля; потери в кабеле — 0,25 дБ/км |
| Потери в волокне на длине 160 км (160+0,05 x 160) | 42 дБ | |
| Дополнительные потери на сростки из расчета 0,1 дБ/сросток | 2.1 дБ | Строительная длина кабеля 2 км, т.е. требуется 21 сросток |
| Дополнительные потери от дисперсии | 2.0 дБ | |
| Запас по мощности | 4,8 дБ | |
| Общие потери линии | 52,9 дБ | |
| Излишний запас по мощности | 9.1 дБ | |

Наличие нескольких децибел лишнего запаса — это плюс, однако запас 9,1 дБ кажется слишком большим. Мы можем рекомендовать уменьшить усиление в связке передатчик-усилитель. Излишняя мощность может привести к возрастанию уровня искажений за счет нелинейностей, таких, как фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция и других. Если мы проектируем систему большой длины, то ее длина может быть увеличена на 40 км за счет использования указанного лишнего запаса.

10.3.4. Пример 3

Предполагается построить кольцо SONET вокруг Муниципальной горы. Длина кольца - 36 км. В кольце будут использованы 12 волокон кабеля: 4 резервных и по 4 в каждом направлении. В качестве первой очереди предполагается использовать транспортный поток уровня STS-3. Однако, с минимумом полевых затрат должна быть предусмотрена возможность последующей модернизации кольца до уровня STS-24 (1244 Мбит/с). Шесть мультиплексоров ввода/вывода (ADM) будут использованы для питания кольца трафиком. При расчете ADM можно считать регенераторами, расположенными на равных расстояниях по кольцу — 6 км. Аналогично, можно рассматривать коммутатор SONET как регенератор в том плане, что мы должны спуститься на электрический уровень, чтобы иметь возможность доступа к фрейму SONET и заголовку OA&M, чтобы иметь возможность осуществлять переключение электрических (а не оптических) сигналов. Коммутатор в этом случае не имеет потерь или усиления. Если это был бы оптический коммутатор, то были бы большие вносимые потери.

Некоторые выводы можно было бы получить непосредственно из вышесказанного:

- используемая скорость передачи должна быть 1244 Мбит/с;
- все секции линии должны быть класса ограниченных по потерям;
- на первом этапе расчета используем СИД в качестве стандартизованного источника, заметим, что мы можем достичь предела по скорости при использовании СИД. Это должно быть исследовано. Если вместо него может быть использован лазерный диод, то бюджет линии должен включать максимальную входную мощность PIN-диода. Если входная мощность приемника выше, чем этот максимум, то надо либо уменьшить выходную мощность источника, если это возможно, либо установить (как и следует) аттенюатор;
- волокно должно выбираться эффективным по критерию цена-качество. Кандидатом может быть даже многомодовое волокно.

Смотри расчет бюджета в табл. 10.7.

Расчетная таблица 10.7

| Параметр или логический объект | Значение | Комментарий или совет |
|---|----------|---|
| Выходная мощность источника света, передаваемая в волокно | -3 дБм | MLM-лазер, модуляционная ширина полоса СИД не достаточна для такой скорости |
| Порог приемника при BER =10 ⁻¹² | -25 дБм | Это порог для PIN-диодного приемника при скорости 1244 Мбит/с |
| Бюджет линии | 22 дБ | |
| Потери линии: | | |
| Потери оптических разъемов | 1,0 дБ | По 0,5 дБ в опорных точках S и R |
| Потери на сростки | 1,0 дБ | |
| Потери в волокне (0,5 дБ/км) на длине 6 км для 1310 нм | 3,0 дБ | Рассматривается расстояние только между соседними ADM |
| Дополнительные потери от дисперсии | 1,0 дБ | |
| Запас по мощности | 3,0 дБ | |
| Оптический аттенуатор ^{а)} | 13,0 дБ | |
| Вносимые потери переключателя маршрутов | 0,0 дБ | |

^{а)} Опция, используемая для уменьшения выходной мощности лазерного передатчика на 10-12 дБ

10.3.5. Пример 4

Допустим, что требуется установить ВОСП, состоящую из одной линии длиной 100 км. Эта линия должна нести 8 каналов WDM, каждый из которых рассчитан на скорость передачи STM-16 (2,5 Гбит/с). Предполагается, что система будет использовать частотный план ITU-T с шагом по частоте 200 ГГц. При оценке потерь волокна будем ориентироваться на волокно ITU-T G.654 с потерями 0,25 дБ/км, включая потери на сростки, и аккумулярованную хроматическую дисперсией на уровне 20 пс/нм/км.

Вносимые потери за счет использования оборудования WDM предполагаются большими. Для оценки этих потерь, вернемся к ITU-T G.671 [10.8], в котором описаны пассивные волоконно-оптические элементы. В этой рекомендации приведены следующие указания.

Мультиплексоры-демультиплексоры WDM. Вносимые потери равны $1.5 \log_2 n$, где n — число портов (т.е. каналов либо входящих в мультиплексор, либо выходящих из мультиплексора — наша интерпретация ссылки [10.8]).

Для нашего примера имеем 8 входных портов для мультиплексора и 8 выходных портов демультиплексора, что дает по 4,5 дБ вносимых потерь для каждого их них. Вносимые потери для фильтра — 1,5 дБ. Следовательно, вносимые потери для 8-канального оборудования WDM, включая фильтры, равны 10,5 дБ ($4,5 + 4,5 + 1,5 = 10,5$).

Учитывая, что каждый канал работает на скорости 2,5 Гбит/с и покрывает пролет 100 км, делаем вывод, что нужно анализировать, к какому классу принадлежит линия: ограниченной по потерям или по дисперсии. Такой анализ будет проведен в разделе 10.4. Мы же, в связи с этим, предположим, что эта линия является ограниченной по потерям. Расчет бюджета мощности можно найти в табл. 10.8.

Расчетная таблица 10.8

| Параметр или логический объект | Значение | Комментарий или совет |
|---|----------|--|
| Выходная мощность источника — лазерного диода SLM | +3 дБм | Максимально рекомендуемый выход,, см. табл. 4 в рекомендации G.957 |
| PIN-детектор: порог приемника с усилителем EDFA | -45 дБм | (-28 + -17 = 45 дБ); скорость 2,5 Мбит/с, BER = 10^{-10} , см. табл. 4 в рекомендации G.957] |
| Бюджет линии | 48 дБ | |
| Потери линии: | | |
| Потери оптических разъемов | 3,0 дБ | 6 оптических разъемов, включая разъем WDM ^{a)} |
| Потери в волокне и сростках на длине 100 км | 26,25 дБ | $(100+0,05 \times 100) \times 0,25 = 26,25$ дБ (5% «лишнего» кабеля; потери в кабеле - 0,25 дБ/км) |
| Потери от оборудования WDM + потери фильтра | 10,5 дБ | |
| Запас по мощности | 4,8 дБ | |
| Общие потери линии | 44,55 дБ | |
| Излишний запас по мощности | 3,45 дБ | |

^{a)} Разъемы следующие: на выходе ЛД, на входе WDM-мультиплексора, на выходе WDM-мультиплексора в волокно, на входе волокна в демультиплексор, на выходе демультиплексора в фильтр, на выходе фильтра в предусилитель EDFA, который интегрирован с приемником.

Заметим, что шаг между каналами в 200 ГГц выбран, чтобы исключить влияние ЧВС. Усиление EDFA предполагается равным 17дБ.

10.4. Полоса пропускания линии связи, время нарастания фронтов, накопленная дисперсия

10.4.1. Бюджет времени нарастания

Время нарастания в системе рассчитывается так, чтобы обеспечить нормальную работу рассматриваемого линии на данной скорости. Время нарастания фронта и время спада импульса определяется стандартом IEEE [10.9] так: «Время нарастания — это время, требуемое для роста интенсивности света от 0,1 до 0,9 номинального значения. Время спада — это время, требуемое для спада интенсивности света от 0,9 до 0,1 номинального значения».

Следующее уравнение связывает время нарастания интенсивности света в системе T_r с временами нарастания составляющих ее элементов:

$$T_r^2 = T_{tr}^2 + T_{\text{fiber}}^2 + T_{\text{rec}}^2 \quad (10.1)$$

где T_{tr} , T_{fiber} и T_{rec} — времена нарастания передатчика света, оптического кабеля и приемника света, соответственно [10.10].

Мы можем связать ширину полосы, Δf и время нарастания T_r с помощью следующего выражения:

$$T_r = 2,2 / 2\pi\Delta f = 0,35 / \Delta f \quad (10.2)$$

Это выражение, с другой стороны, говорит нам, что такое соотношение между шириной полосы и временем нарастания соответствует линейной системе. С величиной 0,35 для произведения $T_r\Delta f$ нужно обращаться очень аккуратно. При проектировании оптоволоконных линий, как правило, используют эту величину, для того чтобы сохранить некий консерватизм в подходе к решению.

Можно предположить, что соотношение между скоростью передачи B , и шириной полосы, Δf зависит от формата цифрового потока, т.е. от того, будет это RZ или NRZ формат. (См. раздел 4.7, где обсуждаются эти форматы.) Следующие ниже указания могут быть полезными при проектировании оптоволоконных линий. Если их соблюдать, то можно быть уверенным в том, что ширина полосы системы будет достаточна для обработки битовой скорости B .

T_r должно быть меньше следующих максимальных значений:

для формата RZ: $T_r \leq 0,35 / B$;

для формата NRZ: $T_r \leq 0,7 / B$. См. [10.10].

Следующие оценки времени нарастания возможно будут полезны инженерам при вычислении времени нарастания T_r и применении уравнения (10.2):

для передатчика с СИД T_r должно быть порядка 2 нс;

для передатчика с ЛД T_r должно быть порядка 0,1 нс.

Когда задана полоса на уровне — 3дБ для оптоволоконных приемников, время нарастания приемника может быть вычислено из уравнения (10.2), где под Δf и понимается эта полоса приемника:

$$T_{rec} = 0,35 / \Delta f \quad (10.3)$$

и используя уравнение (10.1):

$$T_r^2 = T_{tr}^2 + T_{fiber}^2 + T_{rec}^2 \quad (10.4)$$

Теперь инженер-проектировщик может вычислить время нарастания системы, используя 10% коэффициент ухудшения, так:

$$T_r = 1,1 \left(T_{tr}^2 + T_{fiber}^2 + T_{rec}^2 \right)^{1/2} \quad (10.5)$$

T_{fiber} можно вычислить из выражения:

$$T_{fiber}^2 = T_{modal}^2 + T_{GVD}^2 \quad (10.6)$$

где T_{GVD} — время нарастания, определяемое дисперсией групповых скоростей, а T_{modal} — время нарастания, определяемое модовой дисперсией.

Для одномодового волокна T_{modal} равно нулю и $T_{\text{fiber}} = T_{\text{GVD}}$, а T_{GVD} можно вычислить из следующего приблизительного соотношения

$$T_{\text{GVD}} = DL\Delta\lambda \quad (10.7)$$

где D - дисперсионный параметр, $\Delta\lambda$ - ширина спектра оптического источника на уровне половины от максимума, а L — длина линии передачи в км. Значения $\Delta\lambda$ могут быть взяты из таблиц 2-4 в рекомендации ITU-T G.957 [10.2]. Следует заметить, что дисперсионный параметр D может меняться по длине волокна, если различные секции кабеля имеют различные дисперсионные характеристики. Следовательно, мы должны иметь ввиду какое-то среднее значение D [10.10, 10.11].

Пример 1.

Вычислить время нарастания системы, при условии, что заданы следующие значения параметров (см. раздел 10.3.5):

- длина линии: 100 км, волокно G.654;
- время нарастания для передатчика с ЛД: 0,1 нс;
- спектральная ширина источника (табл. 10.4): 1 нм;
- полоса частот приемника: 10 ГГц.

Используемый цифровой формат — NRZ. Скорость передачи — 2,5 Гбит/с.

- Волокно G.654: для данного упражнения используем значение $D = 20$ пс/нм/км, для более аккуратных вычислений следует воспользоваться материалом раздела 6.2 в рекомендации G.654.

- Волокно G.653: для диапазона 1525-1575 нм используем значение $D = 3,5$ пс/нм/км, для более аккуратных вычислений следует воспользоваться материалом раздела 6.2 в рекомендации G.653.

$$T_{\text{fiber}} = T_{\text{GVD}} = DL\Delta\lambda$$

$$T_{\text{fiber}} = 20 \text{ пс/нм/км} \times 100 \text{ км} \times 1 \text{ нм} = 2000 \text{ пс или } 2 \text{ нс.}$$

Полоса пропускания приемника на уровне -3 дБ равна 10 ГГц, следова-

тельно, из (10.3) имеем:

$$T_{rec} = 0,35/10 \times 10^9 = 35 \times 10^{12} = 35 \text{ пс} = 0,035 \text{ нс}$$
$$(0,035^2 = 0,001225).$$

Используя 10.5, получаем:

$$T_r = 1,1 (0,01 + 4 + 0,001225)^{1/2} = 1,1 \times 4,011225^{1/2} = 2,203 \text{ нс}$$

Теперь мы можем протестировать полученное значение времени нарастания системы, чтобы убедиться, что система может поддерживать передачу на скорости 2,5 Гбит/с, используя следующие приблизительные соотношения:

$$\text{Время нарастания системы } T_{rec} \leq 0,7/2,5 \times 10^9 \text{ или } 2,203 \text{ нс} \leq 0,28 \text{ нс.}$$

Неравенство не выполняется, это указывает на то, что система не прошла тест. Что можно сделать в этом случае? По схеме вычислений видно, что самый большой вклад во время нарастания дает T_{fiber} . Есть два решения: во-первых, использовать другое волокно — G.653, имеющее хроматическую дисперсию на уровне 3,5 пс/нм/км. Вычисления в этом случае дают:

$$T_{fiber} = 3,5 \times 100 \times 1 = 350 \text{ пс} = 0,350 \text{ нс.}$$

$$T_r = 1,1 (0,01 + 0,1225 + 0,001225)^{1/2} = 1,1 \times 0,133725^{1/2} = 0,40225 \text{ нс}$$

$$0,40225 \text{ нс} \leq 0,28 \text{ нс.}$$

Неравенство не выполняется, то есть система снова не прошла тест. Что можно сделать в этом случае? Можно уменьшить длину линии допустим до 50 км. Возвращаясь к вычислению T_{fiber} , имеем:

$$T_{fiber} = 3,5 \times 50 \times 1 = 175 \text{ пс} = 0,175 \text{ нс}$$

$$T_r = 1,1 (0,01 + 0,030625 + 0,001225)^{1/2} = 1,1 \times 0,04185^{1/2} = 0,22503 \text{ нс}$$

$$0,22503 \text{ нс} \leq 0,28 \text{ нс.}$$

Неравенство выполняется, то есть система прошла тест.

Нам хотелось бы снова поднять красный или, на худой конец, желтый флаг, чтобы привлечь внимание. Оптоволоконная линия передачи состоит из

кабельных секций, или строительных длин, обычно намотанных на 2 км катушку, но если нужно, могут использоваться катушки с длиной кабеля от 1 до 10 км. Характеристики кабеля (например, дисперсионные) могут достаточно отличаться от катушки к катушке, так, что наши вычисления не будут отражать фактические характеристики. Это может привести к тому, что работающая на бумаге линия не будет работать на практике.

Пример 2.

Линия передачи использует волокно G.653 (с хроматической дисперсией 3,5 пс/нм/км) и передает поток STS-24 (1244 Мбит/с). Предположим, что линия относится к классу ограниченных по дисперсии. Можем ли мы растянуть ее на 200 км без использования регенератора? Для создания усиления, достаточного для того, чтобы иметь надлежащий пороговый уровень на входе приемника, предполагается использовать оптический усилитель типа EDFA. Наша озабоченность в этом случае в том, что линия может быть ограниченной по дисперсии. Линия использует формат кодирования NRZ. Спектральная ширина источника — 1 нм. Для удобства расчеты будем вести в нс.

Для линии, ограниченной по мощности, должны выдерживаться следующие соотношения:

$$T_r \leq 0,7 / B, \text{ где } B = 1244 \text{ Мбит/с, следовательно,}$$

$$T_r \leq 0,7 / 1244 \times 10^6 = 0,5627 \times 10^{-9} = 0,5627 \text{ нс.}$$

Время нарастания для ЛД равно 0,1 нс. Время нарастания для приемника составляет $0,35/10 \times 10^9 = 0,035$ нс.

$$T_r = 1,1(0,01 + T_{\text{fiber}}^2 + 0,001225)^{1/2}$$

$$T_{\text{fiber}} = 3,5 \times 200 \times 1 = 700 \text{ пс} = 0,70 \text{ нс.}$$

$$T_r = 1,1 (0,01 + 0,49 + 0,001225)^{1/2} = 0,7788 \text{ нс}$$

Так как фактическое значение $T_r = 0,7788$ больше, чем требуемое - 0,5627, то данное решение не годится.

В уравнении для определения T_r наибольший вклад вносит волоконная составляющая. Следовательно, именно на эту величину нужно обратить внимание. Вспомним, что эта составляющая определяется уравнением вида: $T_{\text{fiber}} = DL\Delta\lambda$, см. выражение (10.7). Используя это выражение, мы можем уменьшить волоконную составляющую за счет уменьшения:

- хроматической дисперсии (параметр D);
- длины линии L ;
- $\Delta\lambda$ — ширины полосы спектра, излучаемого источником света - ЛД.

Мы можем уменьшить спектральную ширину линии излучения источника света наполовину (0,5 нм) за счет использования более качественного источника излучения. Полагая, что теперь ширины полосы спектра источника света равна 0,5 нм, получим:

$$T_{\text{fiber}} = 3,5 \times 200 \times 0,5 = 350 \text{ пс} = 0,35 \text{ нс}$$

В результате для T_r получаем:

$$T_r = 1,1 (0,01 + 0,1225 + 0,001225)^{1/2} = 0,4023 \text{ нс}$$

Так как фактическое значение $T_r = 0,4023$ меньше, чем требуемое — 0,5627, то данное решение вполне подходит. Итак, мы удовлетворили требуемым характеристикам путем улучшения спектральных характеристик световой волны, излучаемой передатчиком.

10.5. Определение уровней оптической мощности

10.5.1. Уровень мощности канала

10.5.1.1. Минимальная мощность канала

В этом разделе мы опишем, как получить значение минимальной мощности в канале в конце срока службы, которая требуется для поддержания желаемого отношения оптический сигнал/шум (OSNR). В первую очередь мы должны получить соотношение между OSNR и BER.

Очень важно понимать, что BER будет различным в системах с усилением и без усиления. Важным является связь показателя BER с характеристикой приемника, которая должна быть включена в методику проектирования. Итоговая минимальная оптическая мощность канала не зависит от числа каналов (т.е. длин волн) и может быть использована как в одноканальных, так и в многоканальных системах. В этом разделе описывается также, как ASE влияет на ограничение минимальной мощности в канале, как для одноканальных, так и многоканальных оптических систем с оптическим усилением.

Мощность ASE, приходящаяся на единичный частотный интервал, для оптического усилителя определяется выражением:

$$P_{ASE} = 2N_{sp}(G-1)hv \quad (10.8)$$

где $N_{sp} \geq 1$ — коэффициент спонтанного шума, G — внутреннее усиление, h — постоянная Планка и ν — оптическая частота. Внешний коэффициент шума усилителя в дБ определяется выражением:

$$NF = 10 \log \left[2N_{sp} - \frac{2N_{sp} - 1}{G} \right] + \eta_{in} \quad (10.9)$$

где η_{in} - потери на входе усилителя в дБ за счет интерфейсной стыковки. Если сделать упрощенное предположение о том, что общая выходная мощность (включая накопленную мощность ASE) одинакова после каждого усилителя и что усиление G много больше 1, то OSNR дается приблизительно следующим выражением:

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \log N - 10 \log (hv\Delta\nu_0) \quad (10.10)$$

где P_{out} — выходная мощность (на канал) в дБм, L — потери на длине пролета между усилителями в дБ, NF — коэффициент внешнего шума в дБ, $\Delta\nu_0$ — оптическая ширина полосы, N — число пролетов на линии, предполагается, что потери на всех пролетах одинаковы. В полосе 1550 нм член $10 \log (hv\Delta\nu_0) = -58$ дБм на уровне 0,1 нм оптической ширины полосы. Этот подход может быть использован и в тех системах, где потери на пролетах разные; полагая,

что потери на пролетах одинаковые и равны или меньше, чем L , мы получаем оценку OSNR в расчете на худший случай.

Вышеприведенное соотношение дает практическую и полезную оценку, так как OSNR на входе усилителя (точка $R_{(N)}$ на рис. 10.1) является результатом среднеквадратического усреднения N эффективных шумовых источника, так что небольшие различия в уровне потерь выходной мощности на пролетах имеют тенденцию к усреднению. Предположение, что $G \gg 1$, выполняется для большинства систем с усилителями [10.12].

Выражение (10.10) можно использовать для оценки минимальной выходной оптической мощности, которая требуется для поддержки желаемого OSNR. Минимальная выходная оптическая мощность могла бы быть измерена на выходе усилителей. Так как она является ограничением на минимальную мощность в расчете на канал, которое не зависит от числа каналов, то может быть использована как для одноканальных, так и для многоканальных систем.

В случае, когда мощности в отдельных каналах изменяются, можно считать, что если все каналные мощности больше или равны минимальной мощности, то все OSNR также будут больше или равны минимально требуемым значениям.

В реальных системах WDM выходная мощность в каналах будет, вероятно, неодинакова, ввиду разницы в коэффициентах усиления, а также различий шумовых характеристик в отдельных каналах. Кроме того, потери на длине пролетов также, вероятно, будут разные. Тем не менее, выражение (10.10) полезно тем, что устанавливает минимальную мощность в оптическом канале, которую необходимо рассматривать в расчете на худший случай (т.е. когда все потери на длине пролетов принимаются максимально возможными и мы рассматриваем тот канал, выходная мощность которого минимальна).

10.5.1.2. Максимальная мощность канала

Ограничение на максимальный уровень оптической мощности может базироваться или на нелинейных оптических эффектах, или на соображениях о лазерной безопасности. Если максимальная общая выходная мощность (включая ASE) фиксирована на уровне ограничений на лазеры класса 3A, P_{3A} , то максимальная мощность в канале, $P_{ch\max}$, связана с числом каналов зависимостью вида:

$$P_{ch\max} = P_{3A} - 10 \log(M) \quad (10.11)$$

где M - число работающих каналов. Это уравнение приводится в иллюстративных целях, так как выходная мощность может меняться от канала к каналу, до тех пор пока общая выходная мощность меньше, чем P_{3A} . Это ограничение справедливо как для систем с линейными усилителями, так и без них, как это описано в рекомендации ITU-T G.692 [10.12].

В некоторых случаях, нелинейные эффекты в волокне накладывают более жесткие ограничения на уровень выходной мощности, чем соображения лазерной безопасности. В частности, фазовая самомодуляция (SPM), фазовая кросс-модуляция (XPM), вынужденное рассеяние Бриллюэна (SBS) накладывают ограничение на максимальную мощность в канале. Эти ограничения на уровень оптической мощности, налагаемые SPM и SBS, независимы от представленного числа каналов и, в случае SPM, действуют только на системы, использующие волокно G.652 и G.655. Кроме того, XPM действует только на многоканальные системы и более важна для тех из них, которые используют малый разнос каналов. Ухудшения от XPM более существенны для систем с волокном G.652, а не систем с волокнами G.653 или G.655. Максимально разрешенная выходная мощность в каналах, благодаря ограничениям, накладываемым SPM или XPM, будет меняться в зависимости от кода использования, числа и длины пролетов.

Аналогичные пределы на максимальную выходную мощность в каналах, накладываемые за счет SBS, находятся в стадии изучения комитетами ITU-T и здесь не рассматриваются. Четырехволновое смешение

(FWM) влияет только на многоканальные системы и не представляет практических ограничений на системы, использующие волокно G.652 и G.655. Вынужденное рассеяние Рамана также не представляет практических ограничений на многоканальные системы, использующие волокно G.652, как это описано в этой секции и в рекомендации ITU-T G.692. Влияние вынужденного рассеяния Рамана на некоторые многоканальные системы с неодинаковым шагом несущих, использующих волокно G.653, также находится в стадии изучения.

10.5.1.3. Максимальный диапазон изменения мощности канала

Три предела уровней мощности, описанные выше в этом разделе, определяют максимальный диапазон уровней канальной мощности. Минимальная мощность в канале не зависит от представленного числа каналов, тогда как максимальная мощность в канале зависит от представленного числа каналов. Например, если представлено 8 каналов, то максимальный уровень определяется уровнем лазерной безопасности, тогда как при наличии одного канала максимальный уровень мощности диктуется ограничениями, накладываемыми SPM и зависящими от кода использования. Относительно высокая канальная мощность получается только тогда, когда используется несколько каналов, причем эта канальная мощность будет падать при добавлении рабочих каналов. Это, однако, зависит от варианта исполнения оптического усилителя [10.12].

10.5.2. Максимальная полная мощность

Требуемую полную выходную мощность оптического усилителя можно оценить, используя следующее выражение:

$$P_{tot} = \sum P_{out} + NBW_{eff} h\nu 10^{(NF+L)/10} \quad (10.12)$$

Здесь NF и L даются в дБ, а все другие члены выражены в линейных единицах. Последний член является общей аккумулярованной мощностью ASE, а BW_{eff} — эффективная полоса ASE, определенная как полная мощность

ASE, деленная на плотность мощности ASE. Это полоса порядка 20-30 нм для одного усилителя и порядка 15 нм для цепочки из 10 усилителей, до тех пор пока сигнальное усиление близко к максимальному спектральному усилению усилителя. Эта аппроксимация достаточна до тех пор, пока в полной мощности доминирует сигнальная мощность [10.12, 10.13].

ГЛАВА 11 НАРУЖНАЯ ПРОКЛАДКА ВОЛС

11.1. Введение

Наружная часть волоконно-оптической сети может быть кабелем с прокладкой в грунт, или кабелем, подвешенным на столбах при воздушной прокладке. В этой главе мы сделаем упор на прокладке в грунт. Сектор наружной прокладки ВОК может включать также: а) линейные устройства, такие как регенераторы и оптические усилители, б) пассивные элементы, такие как разветвители сигнала. Вопросом большой важности для системного инженера-проектировщика является надежность и встроенные средства поддержания эксплуатационной надежности. Активные линейные устройства требуют первичных источников питания. Это питание может быть обеспечено на месте или может быть передано с помощью медных жил ВОК.

11.2. Прокладка кабеля в грунт

11.2.1. Стандарты маркировки наружной кабельной прокладки

Надлежащий выбор трассы прокладки ВОК очень важен, так как это первый шаг избежать повреждений кабеля в процессе будущей его эксплуатации в этом регионе.

Ниже приведены указания, которые могли бы быть полезны для инженеров наружной прокладки, ответственных за планирование прокладки и укладку кабеля:

1. Планы по прокладке кабеля должны осуществляться на основе информации, полученной в результате изыскательских работ на трассе прокладки кабеля.

2. Рабочие чертежи устанавливают соответствие трассы прокладки

кабеля, содержат информацию о положении и глубине закладки кабеля, и информацию, достаточную для того, чтобы определить местоположение подповерхностных структур. Вместе с этим, табл. 11.1 дает стандартный унифицированный цветовой код для подземных сооружений, который можно встретить в таких проектах кабельной прокладки.

Таблица 11.1

Стандартный унифицированный цветовой код для маркировки подземных сооружений и кабельных линий

| Цвет | Сооружения |
|-------------------|--|
| Красный | Электрические силовые линии и кабельные коллекторы |
| Желтый | Газопроводы, бензо- и нефтепроводы, паропроводы |
| Голубой | Водопроводы, ирригационные линии, линии подачи цементного раствора |
| Зеленый | Канализационные и дренажные коллекторы |
| Оранжевый | Линии связи, включая ВОК |
| Белый | Предполагаемые раскопки |
| Мерцающий розовый | Маркировка временных обследований |

Источник. EIA/TIA-590-A, табл. 1, с. 4, [11.1]

3. При проектировании трассы приходится предвидеть возможные узкие места, возникающие в связи с получением права на прокладку, например, нужно принять во внимание сооружения, которые в будущем могут помешать проходу, а также существующие конкурирующие подземные коммуникации.

4. Приобретение прав на землю и необходимые разрешения должны быть получены до того, как начнется фактическая установка. Они включают разрешение на право прохода; а также должны включать места, отведенные под установку оборудования и рабочее пространство, которое будет включено в сферу последующего обслуживания.

5. Перед началом работ должна быть проведена встреча с представителями местных агентств и подрядчиков и другими, включенными в эти работы, для того чтобы обсудить план работ по сооружению ВОЛС, сроки их выполнения, последовательность этапов и операций и другие

вопросы.

6. Собственники вложенных средств должны проводить инспекции по мере необходимости, чтобы быть уверенными, что строительство ВОЛС осуществляется по одобренному плану.

7. Все важные документы и учетные записи того, что построено, должны контролироваться собственниками вложенных средств. Учетные записи того, что построено, должны быть доступны для правительственных органов или других организаций, планирующих работу в данном месте, чтобы иметь возможность избежать конфликтных ситуаций с кабельными сооружениями, которые были установлены. Ожидается, что построенное не приведет к последующим изменениям законченных общественных работ, ландшафта, достопримечательностей, или сделанных другими подземных сооружений.

Источник. Руководящие указания 1-5 взяты из [11.1].

11.2.2. Глубина прокладки

Прокладка в грунт или коллекторная прокладка должна удовлетворять требованиям на глубину залегания, указанную в табл. 11.2. Эти требования относятся к ВОК. Стандарт TIA/EIA-590-A [11.1] также содержит руководящие указания по «Совместной прокладке силовых кабелей и кабелей связи» и глубине залегания силовых кабелей. В этом стандарте утверждается, что силовые кабели подчиняются документу NESC (Национальный код электрической безопасности, США), Правило 353D [11.2]. Когда ВОК укладывается в землю вместе с электрическим кабелем, минимальная глубина залегания должна соответствовать табл. 11.2 или 11.3, причем выбирается большая глубина.

Глубина прокладки ВОК

| Сооружения | Минимальная глубина залегания, мм |
|---|-----------------------------------|
| Междугородный магистральный кабель | 750 |
| Кабели питания, распределительная сеть | 600 |
| Кабели обслуживания, линии ввода/вывода | 450 |
| Подземные коллекторы | 750 |

Источник. ЕІА/ТІА-590-А, табл. 2, с. 6, [11.1]

Глубина залегания ВОК

| Минимальное фазовое напряжение, В | Глубина прокладки, мм |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 0-600 | 600 |
| 601-50000 | 750 |
| 5000 1-й выше | 1070 |

Источник. ЕІА/ТІА-590-А, табл. 3, с. 6, [11.1]

11.2.3. Маркировка на трассе

Для идентификации общего положения трассы сооружений, рекомендуется использовать, как постоянные наземные маркеры, так и подземные предупреждающие ленты. Эти сооружения, как и вся трасса прокладки ВОК, требуют более точной привязки на местности и нельзя полагаться только на маркеры.

Стандарты, на которые мы ссылались, рекомендуют, чтобы постоянные маркеры располагались на расстоянии прямой видимости друг от друга, так чтобы ясно указывалось направление и положение трассы. Каждый установленный маркер должен быть видим с позиции соседнего маркера в обоих направлениях. Максимальное рекомендованное расстояние должно быть 300 м или меньше. Маркеры идентифицируются по названию сооружения, владельца и соответствующего телефонного номера.

Предупреждающая лента должна быть заглублена в грунт не меньше, чем на 300 мм, и располагаться над ВОК, не отклоняясь от трассы кабеля более, чем на 450 мм. Эти ленты должны иметь достаточную прочность на

растяжение и способность к удлинению, так чтобы при производстве экскаваторных работ их было бы не так просто порвать, и они могли бы значительно растягиваться перед тем, как порваться [11.1].

11.2.4. Вертикальные опоры

Когда ВОК подвешивается на вертикальные опоры, он должен иметь механическую защиту, такую, как кабелепровод (защитную трубу), или U-образную защиту, на опоре, простирающуюся вверх от земли до высоты примерно 2,5 м. Защитная труба, или U-образная защита, должна уходить вниз под землю с помощью согнутого под углом коллектора до определенной глубины залегания кабеля, как указано в табл. 11.2. Вертикальные участки выхода кабеля на опору должны быть расположены в безопасных по отношению к возможным повреждениям кабеля местах. Когда требуется дополнительная защита, ВОК может быть помещен во внутренний трубопровод, который должен возвышаться над U-образной защитой и простираться вплоть до поддерживающего воздушного троса. От подземного коллектора, внутренний трубопровод может идти от кабельного колодца через вспомогательный кабелепровод и U-образную защиту на поддерживающий воздушный трос.

11.2.5. Устройство вводов

Кабельный ввод в здание может быть сделан выше поверхности земли или же заглублен. Кабель должен быть механически защищен внутренним трубопроводом или U-образной защитой.

11.2.6. Прокладка кабеля через водные преграды

Для прокладки кабеля через водные преграды обычно требуется специальное разрешение. В США две организации: Армейский инженерный корпус и Региональный инженерный корпус могут дать советы для исполнителей работ о том, какие разрешения и что конкретно требуется в

связи с получением этих разрешений. Эти организации выпустили публикацию «Программа регулирования — информация для соискателей», которая общедоступна и содержит все необходимые сведения.

11.2.7. Пересечение железных дорог

Крайне желательно уведомить соответствующие надзорные транспортные (железнодорожные) органы в том, какие пересечения железных дорог вы планируете осуществить. Ответственные инженерные службы железных дорог укажут вам утвержденные методы пересечения железнодорожных путей. Хорошим источником информации и дополнительных деталей инженерных проектов пересечения железнодорожных путей является Ассоциация американских железных дорог в Вашингтоне (США).

11.2.8. Прокладка по мостовым переходам

Прокладка кабеля по каждому мостовому переходу должна быть спроектирована отдельно, так чтобы удовлетворять местным условиям и физическим ограничениям, накладываемым географическим положением моста. Местные ограничения, могут меняться от места к месту. Для формирования структуры и создания защиты ВОК при такой прокладке обычно требуется использовать коллектор.

11.2.9. Пересечение автомагистралей

При проектировании кабельных сооружений большой длины в городах очень удобно использовать (городскую кабельную канализацию, расположенную вдоль улиц), право прохода улиц, а также основных шоссе и других менее важных магистралей. Все штаты и многие графства имеют законы или постановления, которые разрешают и определяют правила использования земли, отведенной под общественные дороги. Существуют специальные соглашения для данного региона, оговаривающие права на

использование коммунальных сооружений, расположенных вдоль данной трассы/магистрали.

Владелец ВОЛС может получить информацию по этому вопросу в «Руководстве по использованию коммунальных сооружений в рамках получения права прохода по шоссе и магистралям». Этот документ выпускается Американской ассоциацией государственных магистралей и транспортными департаментами».

Тип магистралей, конструкция ВОК, почвенные условия, уровень и схема трафика, зоны отчуждения и другие ограничения будут оказывать влияние на степень приспособленности кабельных сооружений к проходу по ним соответствующих магистралей.

11.2.10. Экскаваторные работы и повреждения

Большинство штатов имеют законы, нацеленные на обеспечение безопасной эксплуатации построенных сооружений и минимизации вероятности повреждений подземных сооружений. Эти законы меняются от штата к штату. Можно ожидать, что эти законы определяют такие случаи, как работа с единым заказчиком, заблаговременное уведомление собственника перед началом экскаваторных работ, размер допустимой зоны работ, правила использования унифицированного цветового кода Координационного совета по коммунальным сооружениям (ULCC), для временной маркировки положения трассы (оборудования) и регистрации его владельцев в местном правительственном офисе.

Руководящие указания должны быть получены в Администрации профессиональной безопасности и здоровья (OSHA, см. Code of Federal Regulations, title 29, Ch.XVII, subpart P, Excavations, Section 1926.651). В них указано, что «приблизительное положение коммунальных сооружений, таких как канализационный коллектор, телефонные, топливные, силовые и водопроводные линии, а также другие подземные сооружения, которые могут встретиться при выполнении экскаваторных работ, должны быть опре-

делены до того, как начнут производиться вскрышные и экскаваторные работы». Эти руководящие указания также рекомендуют оповестить соответствующие службы о предполагаемых работах заранее, до того, как они начнутся.

Очевидно, что производители экскаваторных работ и владельцы оборудования должны знать о тех законах и регулирующих актах, которые предусматривают методы и процедуры предотвращения возможных повреждений линий в этих рабочих зонах. Требуется, чтобы обе стороны соблюдали не только букву, но и дух таких законов, чтобы минимизировать, или исключить вовсе, возможность случайного повреждения подземных сооружений ВОЛС и, тем самым, уменьшить степень ответственности, накладываемой на производителя экскаваторных работ за перерыв связи.

11.2.11. Восстановление повреждений

Владельцы оборудования, т.е. владельцы ВОЛС, которая сооружалась, восстанавливают оборудование, поврежденное во время экскаваторных работ. Нужно предварительно подготовиться к возможности возникновения таких событий. К сожалению, каждый случай таких повреждений отличается ситуацией, сопутствующими обстоятельствами и условиями, которые должны быть обработаны и скоординированы для того, чтобы быстро восстановить связь.

Производители экскаваторных работ или сооружений должны быть подготовлены к проведению восстановительных работ, которые включают следующие элементы и виды работ:

- сетевые карты и записи, данные измерений установленного оборудования, требования, необходимые для быстрого и эффективного восстановления работы линии;

- запасные кабели, как ВОК, так и медножильные кабели, требуемые для восстановительных и ремонтных работ (необходимо иметь: отрезки кабеля требуемого типа, качества и номенклатуры, в соответствии с тем, что

было заложено при проектировании);

- тренированный персонал, включая сварщиков, с необходимым запасным набором для проведения сварных работ и тестового оборудования;

- питание и другое оборудование, необходимое для временного восстановления;

- нужно также быть подготовленным к необходимости проводить требуемые измерения оборудования.

11.3. Планирование трассы и прокладка ВОЛС

11.3.1. Волоконно-оптические кабели

Организации связи накопили, грубо говоря, миллионы человеко-лет опыта прокладки медножильных пар и ВОЛС. Конечно, было бы желательно использовать для прокладки ВОЛС те же самые методы, что и раньше. Однако, особое внимание должно быть уделено низкой способности ВОК к перегрузкам, его критическим характеристикам на изгиб, большим возможным строительным длинами и воздействию на ВОК окружающих условий.

11.3.2. Планирование трассы прокладки

Мы можем воспользоваться многими процедурами, используемыми при прокладке медножильных кабелей, но некоторые вопросы прокладки ВОК должны рассматриваться отдельно. Они включают (хотя и не ограничиваются) следующее:

- влияние сварки и оптических разъемов на длину секции (расстояние от оптоволоконного терминала или мультиплексора ввода-вывода (ADM) до соседнего регенератора или между двумя регенераторами). Термин *span length*, используемый автором при этом, соответствует фактически *длине пролета*, а приведенное определение - *длине секции*, эти понятия совпадают только для однопролетной секции, см. [A-21];

- большие строительные длины ВОК;
- допуски, используемые в системах передачи, на дополнительное число сростков и/или оптических разъемов;
- различия в конструкции ВОК (по сравнению с медножильным кабелем), при планировании и прокладке нужно быть особенно аккуратным, учитывая низкую перегрузочную способность, характеристики на изгиб и допустимый диапазон температур окружающей среды;
- характер трассы и условия допуска персонала при прокладке и обслуживании, а также информацию о местности;
- важность информации и тренинга, как части планирования процесса прокладки кабеля.

11.3.2.1. Выбор трассы

Важность обследования трассы невозможно переоценить. Во внимание должны быть приняты топография и условия осуществления прокладки, а для больших пролетов должны быть тщательно спланирована еще и возможность доступа по трассе. Кабелепроводы должны быть в хорошем состоянии. Более тонкий, как правило, ВОК дает возможность использовать несколько труб меньшего диаметра, что может обеспечить лучшее использование кабелепровода в целом, лучшие условия прокладки и обслуживания. В больших кабелепроводах, содержащих несколько кабелей, положение ВОК в средней части кабелепровода более предпочтительно.

В системах с подвесными кабелями важно минимизировать раскачку и натяжение кабеля, для того чтобы увеличить устойчивость опор подвески. При подвеске необходимо использовать линейную арматуру, разработанную для подвески ВОК. Оптические кабели большей пропускной способности должны подвешиваться на самую верхнюю позицию опор.

Другие моменты, которые должны приниматься во внимание — это специальные требования, предъявляемые к подземным и надземным структурам, используемым при прокладке ВОК, которые учитывают физические

ограничения и особенности волокна, отмеченные выше.

11.3.2.2. Общая длина секции или пролета

Эта длина основана на понятии *бюджета линии*, мы обсуждали его в гл. 10, которое в некоторых работах называют *максимальными потерями внешней прокладки*. Нужно иметь в виду, что на эти потери оказывают влияние многие факторы, такие, как затухание волокна, уложенного в кабель (кабельное затухание), а также число оптических разъемов и сростков на длине звена. Длина трассы, которая содержит большой сегмент с воздушной кабельной подвеской, может быть короче, благодаря тому, что нужно предусмотреть дополнительное затухание за счет изменения климатических условий.

Консервативный подход, рассчитанный на быстрое восстановление связи после обрыва волокна/кабеля, состоит в резервировании определенной длины рабочего кабеля, равной наибольшей длине кабеля, проложенного в секции кабелепровода. Если сердечник кабеля не заполнен, то волокна в таком кабеле могут лопаться на длине сотен метров от места раскопок; если же сердечник кабеля заполнен, или если он разделен на дискретные сегменты и блокирован, то волокна в таком кабеле могут лопаться только вблизи разрыва оболочки. Поэтому для кабеля с незаполненным сердечником организация ИТУ-Т (см. [11.2]) рекомендует использовать кабельный резерв, равный или больший по длине наиболее длинному участку кабеля, независимо от того, где он находится: в секции кабелепровода, закопан в землю, или подвешен на опорах.

11.3.2.3. Определение общей длины кабеля

Общая длина кабеля берется из окончательно одобренного плана. К ней добавляется дополнительная длина для каждого сростка и оптического разъема. Она должна включать один полный оборот резервного кабеля вокруг кабельного колодца, где расположен сросток или оптический разъем,

плюс резервный отрезок кабеля внутри муфты или корпуса разъема. Полная кабельная длина также может включать отрезок кабельного ввода в здание, рассчитанный от первого или последнего внешнего сростка/разъема, помещенного в оптический распределительный кросс, расположенный рядом с оконечным волоконно-оптическим терминальным оборудованием, или отрезок кабеля в здании от аппаратной до кабельного распределительного кросса.

Резервная длина может быть в диапазоне от 4 м (только запасной отрезок кабеля в муфте или организаторе) до 12 м.

11.3.2.4. Длина кабеля на катушке или барабане

По сравнению с медножильными кабелями, на катушке можно разместить больше ВОК. Эквивалентный 2-жильный ВОК значительно меньше и легче, чем витая пара или коаксиальный кабель. Можно было бы оптимизировать размер катушек и вес, для того чтобы с ними было легче обращаться в поле. Однако нужно заметить, что производители ВОК поставляют катушки, на которых можно намотать не больше, чем несколько километров кабеля. После этого цена за метр начинает расти.

Для длинных трасс, максимальное разнесение сростков зависит от физических характеристик трассы (например, горы, пересеченная местность, плоская равнина). Максимальное разнесение сростков, конечно, зависит от максимальной длины кабеля на катушке. Кабельная длина, помещаемая в кабелепровод или коллектор будет короче, благодаря ограничению в усилии натяжения при затягивании и фактических расстояний между кабельными колодцами. Длина кабеля, наматываемого на катушку/барабан, зависит от диаметра кабеля и изменяется от 1 до 10 км.

Вычисляя длину намотанного кабеля, инженер должен принять во внимание следующее. Для кабелепроводов длина ВОК на барабане определяется (при определении позиций сростков) следующим образом:

- расстояние между сростками = x (м);

- допуск на увеличение длины = 2% от x (м);
- сращивание + допуск на измерение — 10 м на каждом конце = 20 м;
- таким образом, длина ВОК на барабане для кабелепровода длиной x метров равна $(1+0,02)x + 20$ м.

Важно принять во внимание, что для длинных секций, уложенных в кабелепровод, минимизация числа стыков должна быть согласована с возможностью прокладки полученных длин кабелей. Дополнительное выделение кабеля должно быть достаточно для организации дополнительных сростков сверх необходимого, если это понадобится при прокладке кабеля [11.2].

Для задувки кабеля в трубы или при непосредственной укладке в грунт кабелей, затыгиваемых в отдельные трубы, длина кабеля на барабане определяется следующим образом (если положение сростков было надлежащим образом вычислено):

- расстояние между стыками по данным измерений или на основании плановой документации = x (м);
- допуск на сращивание с помощью разъемов + допуск на измерение - 10 м на каждом конце = 20 м;
- таким образом, длина ВОК на барабане для непосредственной укладки на трассу длиной x метров равна $(x + 20)$ м.

11.3.2.5. Число и положение сростков/оптических разъемов

Число сростков зависит от длины ВОК, намотанного на катушку, местоположения и физических ограничений выбранной трассы. Вообще говоря, если трасса проходит по простой местности, то чем больше длина кабеля на катушке, тем меньше сростков будет на линии. Другой вопрос - состояние и положение кабелепровода/коллектора. Может случиться так, что нельзя положить кабель большой длины. Аналогично, и при прямой укладке в грунт, могут быть препятствия на трассе, которые требуют обрезать кабель и осуществлять подводку кабеля к препятствию с двух сторон. Как правило, можно ожидать, что сростки будут каждые один-три километра.

Сростки располагаются в колодцах кабелепроводов или коллекторных систем, а также в небольших люках, закопанных в месте сращивания (handhole) при непосредственной укладке в грунт, или же прикрепленных к поддерживающему тросу при воздушной прокладке. В системах кабельного распределения абонентов/пользователей систем кабельного телевидения (НФС, см гл. 13) сростки могут располагаться в наружных шкафах кабельной разводки, там, где планируется расширение или модернизация сети.

11.3.2.6. Право на проход/прокладку

Право на проход/прокладку является одним из наиболее важных факторов, определяющих стоимость проекта прокладки ВОЛС. В общем случае, руководящие указания могут быть основаны на опыте прокладки и права на проход металлических кабельных линий. Кабели обычно прокладывают на объектах общественной собственности, например, вдоль магистралей, и кабелепроводные системы располагаются под или рядом с улицей или дорогой.

Другое удобное право на прокладку вдоль железных дорог, линий электропередачи, газо- и нефтепроводов. Еще один вариант — прокладка по сельскохозяйственным угодьям. Здесь получение права на проход может быть наиболее сложным и трудным. Однако, если маршрут ВОЛС пролегает там, где используется глубокая вспашка, глубина залегания кабеля может выбрана глубже, если требуется пересечь сельскохозяйственные земли.

Фаза планирования должна следовать за обследованием местности, для того чтобы понять можно ли вообще использовать планируемый маршрут. Например, такие вопросы встают в случае, если трасса проходит через общественные дороги, частную собственность, если она наталкивается на сооружения других организаций, которые могут создать проблемы (например, энергокомпания), если встает вопрос о том, можно ли использовать существующий кабелепровод, созданный другими организациями, или, если целостность дома, башни и т.д. может оказаться под угрозой при прокладке

ВОЛС.

Окончательный план прокладки формулируется после того, как все вышеперечисленные вопросы будут рассмотрены и все необходимые консультации в различных федеральных и муниципальных органах, а также у частных владельцев, будут получены.

11.3.2.7. Коллекторные трубы, кабельные колодцы, кабелепроводы, короба

В тех случаях, когда существуют кабелепроводы, в которых нет достаточного места для размещения в одном из них ВОК, нужно рассмотреть возможность создания дополнительной системы кабелепроводов. Рекомендуется, чтобы все эти дополнительные системы были установлены в одно и то же время и так, чтобы ее выполнение не затягивалось.

Ниже приведены причины того, почему кабели не могут быть уложены непосредственно в грунт:

- требуется механическая защита;
- наличие дорог и других препятствий;
- возможное расширение в будущем;
- требуется защита от грызунов.

В качестве предварительных мер, можно уложить одну или несколько запасных труб, или использовать трубоукладчик, или воспользоваться непосредственной укладкой в траншею. Запасные трубы состоят из отдельных секций длиной 2500 м [11.2], которые соединяются вместе с помощью фитингов для получения единого трубопровода, перекрывающего всю длину трассы. Впоследствии, используя знание фактической длины ВОК на катушке, или длины затягиваемого отрезка кабеля, ВОК протягивается через трубопровод. В точках стыковки, трубопровод открыт, на некоторое время, и последовательно герметизируется. Там, где должно выполняться сращивание, например, в кабельных колодцах, при начальном обследовании нужно убедиться, что в каждом из них достаточно места для помещения необходимых

устройств для сварки и измерения, а также для монтажного стола, освещения и т.д.

Материал кабелепровода или трубопровода (в отечественной литературе трубопровод называется ЗПТ — защитной полиэтиленовой трубой.), как правило, ПВХ или высокоплотный полиэтилен, или стекловолоконный эпоксидный компаунд. Внутренние и внешние стенки кабелепровода могут иметь продольные ребра или гофрированную поверхность для облегчения процесса протягивания при прокладке ВОК [11.3].

Кабелепроводы имеют минимальный радиус изгиба. Кабель, протянутый через такой кабелепровод, не должен иметь радиус изгиба, меньше положенного. Этот радиус должен быть определен как допустимый, или недопустимый. Только допустимый радиус должен быть использован, если кабелепровод огибает поддерживающую структуру, такую как другой кабелепровод или катушка.

Кабелепровод может быть заказан у производителя вместе с лентой для вытягивания, которая помогает в процессе протягивания. Кроме того, кабелепроводы могут быть предварительно смазаны, что значительно уменьшает требуемое натяжение при протягивании кабеля. В заключение необходимо сказать, что кабелепроводы должны иметь концевую заглушку, чтобы предотвратить просачивание воды. Очень важно сохранять кабелепровод сухим и свободным от строительного мусора. Если рассуждать о размерах кабелепровода ов, то было бы хорошо использовать такое эмпирическое правило: коэффициент заполнения не должен превышать 40%. Например, 1-дюймовый кабелепровод предполагается заполнить ВОК с внешним диаметром 0,6 дюйма. Коэффициент заполнения можно вычислить по формуле:

$$\text{Коэффициент заполнения (\%)} = (d^2/D^2) \times 100,$$

где d — внешний диаметр ВОК, D — внутренний диаметр рассматриваемого кабелепровода. Для длинных кабельных линий следует использовать кабелепроводы большего размера, для того чтобы облегчить процедуру протяги-

вания ВОК. Стандартные размеры кабелепровода изменяются от 3 до 8 дюймов (от 76,2 до 203,2 мм), а размеры внутренних трубопроводов изменяются от 0,75 до 2 дюймов (от 19,2 до 50,8 мм) [П.3] (соответствующие размеры и рекомендации см. в [А-10, А-14]).

Для затягивания больших длин кабеля, использование смазки, обязательно. Основываясь на работе [11.3], смазка должна применяться на всех станциях кабельного ввода и промежуточной протяжки кабеля, а также всегда, когда возможно, перед тем, как согнуть кабель. Смазка должна использоваться с сальником и насосом и покрывать внутренние стенки кабелепровода по всей длине.

Коэффициент трения смазки должен быть меньше 0,25. Смазка не должна влиять на внешнее покрытие кабеля, коллекторный кабелепровод или внутренний трубопровод в течение всего гарантийного срока службы сооружения.

После того, как кабель проложен, следует провести его измерение с помощью оптического рефлектометра (OTDR) по всей длине и для каждого волокна (см. гл.15).

11.3.2.8. Использование кабелеукладчика, или прокладка кабеля в грунт

ВОК может быть проложен в грунт, с укладкой в заранее вырытую траншею, или непосредственно с помощью кабелеукладчика с плугом. Прокладка в траншею более предпочтительна, потому что она наносит кабелю меньше повреждений и обеспечивает большее качество прокладки. Однако она более дорогая по сравнению использованием кабелеукладчика. Укладка в траншею используется в условиях скальных грунтов, когда доступ кабелеукладчика затруднен. При укладке кабеля на дно траншеи должна быть создана специальная подушка из песка, а большие или же острые камни нужно удалить из земли перед закапыванием траншеи, чтобы избежать последующего повреждения кабеля.

Использование кабелеукладчика с плугом (как процедура) дешевле. Это вполне удовлетворительный метод, если почва мягкая и право прохода получено. В условиях, когда встречаются твердые почвы, можно посоветовать провести предварительную вспашку пустым плугом, перед тем, как пустить кабелеукладчик с кабелем. Можно также прокладывать больше одного кабеля за один проход или укладывать одновременно кабель и трубопровод. Закопанный пустой трубопровод можно будет впоследствии использовать для прокладки второго кабеля.

11.3.2.9. Использование воздушной подвески кабелей

Нужно ли рассматривать подвеску кабеля, как один из вариантов прокладки? Видимо, да, если учесть, что она имеет следующие преимущества:

- можно использовать существующие линии электропередач;
- она не зависит от типа почвы;
- прокладку, вероятно, можно будет осуществить быстрее;
- существуют возможности использовать большие строительные длины ВОК;
- ее легче обслуживать, особенно, если кабельная линия идет вдоль дорог.

Однако существуют и недостатки воздушной прокладки:

- у нее меньше срок службы в связи с воздействием окружающей среды;
- возможность возникновения излишнего механического напряжения в неблагоприятных погодных условиях, таких как ветер, оледенение и чрезмерно длинный пролет;
- неэстетичность.

11.3.3. Особенности прокладки кабеля

Производитель работ по прокладке может использовать те же методы

прокладки, что и при прокладке металлических кабелей. Однако, некоторые особенности ВОК нужно принять во внимание. Они включают: а) легкую возможность возникновения перегрузок волокна; б) необходимость обеспечения надлежащих условий изгиба кабеля и методов направления кабеля при протягивании, кроме этого нужно ожидать использования больших строительных длин кабеля (по сравнению с металлическим кабелем). Принципиальный момент в том, чтобы обеспечить при прокладке ВОК как можно менее напряженные условия прокладки. Рекомендуемые производителем физические ограничения должны выполняться неукоснительно.

11.3.3.1. Установка кабелепровода/пластмассовой трубы

При установке ВОК нужно быть очень внимательным, учитывая малый размер и относительно низкую прочность волокна (по сравнению с металлическим кабелем). Факторы, которые ограничивают длину ВОК при затягивании в кабелепровод, включают:

- число и степень изгибов;
- число поворотов в кабельных колодцах;
- уровень изменений между колодцами;
- материал, из которого изготовлен кабельный колодец;
- неровность кабелепровода/трубы, наличие поврежденных или отремонтированных секций, общее состояние кабелепровода/трубы.

Существует ряд приемов, которые могут ослабить влияние этих факторов и максимизировать расстояние между сrostками:

- возможность протягивания кабеля из средней точки кабелепровода/трубы в обе стороны после смены положения, или позиционирования кабеля перед вторым протягиванием;
- протягивание в одном направлении с организацией петли у промежуточных колодцев, где кабелепровод/труба делает резкий поворот, или с каждой стороны от «трудной» секции;
- протягивание с уклоном вниз более предпочтительно, чем с уклоном

вверх;

- использование надлежащей смазки;
- тщательная чистка и контроль зазоров в каждом кабелепроводе/трубе;
- использование промежуточных точек протягивания и использование соответствующего оборудования для направления кабеля при протяжке.

Если ВОК прокладывается в том же кабелепроводе/трубе, где уже имеются другие большие кабели, например, силовые, то он должен иметь минимальный диаметр, чтобы избежать заклинивания.

Нужно рассматривать возможность применения лебедок. Существует возможность непрерывного мониторинга натяжения кабеля при протяжке. Лебедки монтируются на трейлере и полностью автономны. Они могут быть перемещены когда и куда требуется.

11.3.3.2. Непосредственная укладка

При использовании траншей, кабели могут прокладываться непосредственной укладкой в грунт. Укладка в траншее используется на тяжелых участках, где имеется скальный грунт. Там, где возникают трудности с протягиванием, использование траншей обязательно. Кабель обычно прокладывают вручную с моторизованных средств доставки катушек с кабелем. Важно выравнивать направление траншей, чтобы кабель тянулся прямо.

Материал для засыпки кабеля, должна быть из мелкого песка, он должен располагаться вокруг кабеля и тщательно уплотняться. Если засыпка не содержит мелкого песка, то ее нужно доставить и уложить вокруг кабеля. Глубина укладки кабеля должна быть такой, как рекомендуется в табл. 11.2 (750 мм), или определяться местными рекомендациями.

Резервные трубы и кабель для непосредственной укладки должны быть промаркированы с помощью маркерной ленты, расположенной примерно на 30 см выше кабеля или уложенной трубы, на которой должна быть надпись, предупреждающая о наличии кабеля.

11.3.3.3. Использование кабелеукладчика

Использование кабелеукладчика является более экономичным способом прокладки, чем укладка в траншею. Этот вариант должен рассматриваться в тех случаях, когда налицо длинный и без препятствий участок кабельной трассы. Как мы уже упоминали, основным, при принятии решения об использовании кабелеукладчика, должна быть возможность избегать кратковременных динамических нагрузок и оценка общего уровня натяжения при прокладке ВО К.

Натяжение устанавливаемого кабеля может быть уменьшено путем низкофрикционной вставки в кассету кабелеукладчика и использования кривых с большим радиусом изгиба. Одной из таких возможностей является установка мощного вала большого диаметра в задней части бульдозера, который используется для того, чтобы тянуть кабель, сматываемый с барабана, и подавать его в выходную кассету при минимальном натяжении. Необходимо избегать высокого динамического натяжения, вызванного чрезмерной скоростью подачи, а также резкими смещениями кабельного барабана, вызванными резкими изменениями скорости или положения бульдозера. Маркерные ленты зарываются вместе с кабелем так, чтобы они располагались на высоте 30 см над кабелем или над запасной трубой. Глубина закапывания, в соответствии с табл. 11.2, составляет 750 мм.

11.3.3.4. Воздушная подвеска

В зависимости от конструкции кабеля существуют два метода воздушной подвески: с самонесущим кабелем и с подвеской на несущем тросе.

Самонесущий кабель. Такой кабель первоначально выкладывается вдоль линии опор на кабельных блоках, расположенных в точках установки опор. Это можно сделать с помощью установочных средств передвижения (кабельных тележек), в зависимости от полевых условий, или путем затягивания кабеля вручную.

Можно использовать пролеты различной длины, если правильно выбрать провисание ВОК, принимая во внимание избыточную нагрузку. Для размещения воздушной линии рекомендуется использовать самую верхнюю позицию на опорах во избежании проблем, связанных с проездом под линией высокогабаритных средств передвижения.

Кабель с подвеской на несущем тросе. При такой схеме подвески необходимо использовать несущий (поддерживающий) трос. ВОК прикрепляется к несущему тросу либо на земле, либо после того как будет подвешен несущий трос. Несущий трос предварительно туго натягивается, что позволяет избежать чрезмерного удлинения кабеля. Во время этой процедуры нужно принять меры, чтобы избежать повреждения кабеля, в частности, из-за влияния сильного натяжения несущего кабеля на ВОК. Провисание ВОК должно быть выровнено до прикрепления к нему кабеля, если несущий трос подвешивается на опоры после прикрепления к нему ВОК.

11.3.3.5. Зоны возможных проблем на пути укладки кабеля

Пересечение рек. Если маршрут ВОЛС должен пересекать реку, озеро или другую водную преграду, то нужно строго придерживаться следующего:

- для секции ВОК, используемой при пересечении водной преграды, должен использоваться специальный кабель, спроектированный для прокладки под водой и имеющий армированную защитную оболочку;
- следует избегать расположения сростков под водой, нужно использовать для подводного пересечения непрерывный отрезок кабеля;
- следует избегать возможных движений кабеля в любом направлении, заглубляя кабель в придонный слой почвы;
- часто при такой прокладке используется баржа или лодка, поэтому при расчете требуемой длины нужно учитывать процент ее увеличения за счет провисания при прокладке;
- если все-таки необходим сросток в середине пролета, нужно

предусмотреть возможность восстановления армированной защитной оболочки вокруг сростка, чтобы она могла противостоять давлению воды без утечки.

Вертикальная прокладка для зданий, башен, мостов и т.д. Подход, используемый для организации ввода ВОК в здание, очень похож на тот, что применяется для металлических кабелей. Поэтому следует использовать тот же набор крепежных средств.

Эпоксидные анкерные блоки вставляются, чтобы фиксировать ВОК и кабельную структуру вместе, там, где кабель прокладывается вертикально в здании, на опоре моста или подобных структур. При этом предлагается соблюдать следующие правила закрепления:

- для внутренних оконечных кабелей - каждые 3 метра или меньше;
- для заполненных кабелей - каждые 30 метров или меньше.

Располагайте первый анкерный блок в верхней части вертикальной секции. Следует предусмотреть, чтобы каждый анкерный блок был зафиксирован механически в вертикальном стояке. Рекомендуется, чтобы кабельные сростки были удалены, насколько это возможно, от верха и низа вертикальной секции.

Положение сростков и защита. Стыки/сростки в кабельных колодцах располагаются ближе к верхней части колодца и как можно ближе к его стенкам, так чтобы эта позиция создавала наибольшую защиту от возможных механических нагрузок, возникающих, если обслуживающий персонал случайно наступит на стык/сросток. Муфты со сростками и стыками кабелей непосредственной прокладки в грунт или резервную трубу также должны быть уложены в грунт.

Муфты для сращивания/стыковки должны располагаться как можно ближе к трассе кабельной прокладки. Они должны быть сконструированы так, чтобы выдерживать прямую прокладку в грунт, также как и установку в колодце. Пластиковая сетка используется для покрытия таких муфт. В них должна быть предусмотрена возможность размещения лишнего витка кабеля

с физической защитой от ручных средств извлечения муфты.

11.3.3.6. Максимальное растягивающее усилие ВОК

Существуют ограничения на растягивающее усилие при протягивании кабеля при его установке, протягивании в коллекторе, вдоль траншей или вдоль любой направляющей системы. В табл. 11.4 приведены некоторые нормативные значения таких растягивающих усилий для типичного ВОК. Эти максимальные значения натяжения никогда не должны превышать. Избыточные усилия приводят к постоянному удлинению кабеля. Удлинение может вызвать порчу кабеля из-за обрыва волокон.

Замечания по поводу протяжки кабеля. *Хвостовая нагрузка* — это натяжение кабеля, вызванное массой кабеля, намотанного на катушку, и устройствами торможения катушки. Она может быть минимизирована путем использования небольшого усилия торможения или исключения торможения в процессе сматывания кабеля с барабана. Часто отсутствие торможения предпочтительнее. Хвостовая нагрузка может быть минимизирована путем вращения катушки в направлении сматывания, при этом нужно быть внимательным, чтобы не допустить излишнюю скорость вращения.

Таблица. 11.4

Максимальное натяжение протягивания

| Конструкция и тип кабеля внешней прокладки | Макс, натяжение протягивания, н |
|--|---------------------------------|
| Распределительный кабель, диэлектрический | 1800 |
| Распределительный кабель, армированный | 1800 |
| Распределительный кабель, самонесущий | 4500 |
| С центральной трубкой, диэлектрический | 2700 |
| С центральной трубкой, армированный | 2700 |
| С буферной трубкой, диэлектрический | 2700 |
| С буферной трубкой, армированный | 2700 |

Источник. Из табл. на с. 7.2 в CommScope *HFC Upgrade Manual* [11.7], таблица основана на ВОК компании CommonScope Optical Reach

Динамометры используются для измерения динамического натяжения на кабеле. Они позволяют непрерывно следить за натяжением при протягивании. Это позволяет отслеживать мгновенные увеличения натяжения, вызванные такими факторами, как сгибание кабеля в точках входа и выхода или в крутую петлю.

Устраняющие торможение вертлюги используются автономно или совместно с динамометрами для того, чтобы быть уверенным, что максимальное натяжение не будет превышено. Вертлюг с тормозным натяжением эквивалентен устройству натяжения протягивания кабеля, помещенному между кабельным съемником и тянущим захватом. Один такой вертлюг должен быть использован для каждого протягиваемого кабеля.

11.3.3.7. Минимальный радиус изгиба

Минимальный радиус изгиба был рассмотрен в гл. 2, а его размеры указаны в табл. 2.2(б). Оптоволоконные кабели часто по схеме трассы огибают углы сооружений. Более гибкие кабели (т.е. такие кабели, которые допускают меньший радиус изгиба) требуют меньшего натяжения протягивания при прокладке с огибанием углов на трассе.

Нужно быть особенно внимательным, чтобы в процессе установки кабеля радиус изгиба не был меньше минимального. Перегнутый больше положенного кабель может деформировать и повредить волокно внутри кабеля и вызвать скачок в характеристике затухания.

В табл. 11.5 приведены значения минимальных радиусов изгиба для различных типов ВОК. Для оптических кабелей радиусы изгибов даются для двух состояний: *нагруженного* и *ненагруженного*. Нагруженное состояние означает, что кабель находится под действием натяжения протягивания и одновременно сгибается. Ненагруженное состояние означает, что кабель не натянут или уровень остаточного натяжения составляет около 25% от максимального натяжения протягивания, см. табл. 11.4. Радиус изгиба в ненагруженном состоянии также является допустимым радиусом изгиба при

хранении ВОК.

Радиус изгиба в нагруженном состоянии в процессе установки ВОЛС должен контролироваться персоналом и оборудованием. Смазка необходимых элементов оборудования помогает уменьшить натяжение протягивания, требуемое для затягивания кабеля в кабелепровод или коллектор.

Таблица 11.5

Минимальные радиусы изгиба

| Тип ВОК наружной прокладки/ число волокон | Минимальный радиус изгиба, см | |
|---|-------------------------------|---------------|
| | Нагруженный | Ненагруженный |
| Распределительный кабель, диэлектрический/ 18 | 18,5 | 9,2 |
| Распределительный кабель, армированный/ 18 | 18,5 | 9,2 |
| С центральной трубкой, диэлектрический/48 | 24,9 | 12,4 |
| С центральной трубкой, армированный/48 | 25,4 | 12,6 |
| С центральной трубкой, армированный/96 | 29,0 | 14,5 |
| С буферной трубкой, диэлектрический/72 | 24,9 | 12,4 |
| С буферной трубкой, армированный/72 | 27,7 | 13,9 |
| С буферной трубкой, армированный/216 | 36,6 | 18,4 |

Источник. Из табл. на с. 7.3 в CommScope *HFC Upgrade Manual* [11.7].

Избыточные петли. Избыточный кабель вытягивается и организуется в виде петель внутри кабельных колодцев, или тайников, для того, чтобы облегчить сращивание или быть использованным в кабельной секции. Нормально для этих целей выделяется дополнительные 5% от длины пролета, которые сохраняются в процессе установки (в виде петель) через регулярные промежутки. Петли должны быть уложены в каждом кабельном колодце, или тайнике. Радиус петли не должен быть меньше минимально допустимого радиуса изгиба ВОК.

11.4. Измерения при внешней кабельной прокладке и приемо-сдаточные испытания

После того, как внешняя часть прокладки ВОЛС была закончена,

рекомендуется провести следующие измерения и процедуры проверки качества линии:

- измерение полного затухания кабеля, включая сростки и оптические разъемы;
- измерение хроматической дисперсии;
- осмотр металлических частей;
- качество сростков;
- подтверждение (путем тестирования и вычислений) необходимых допусков на обслуживание;
- осмотр оптических разъемов.

11.4.1. Полное затухание

После прокладки кабеля ВОЛС измеряется полное (из конца в конец) вносимые потери для каждого волокна в ВОК. Длина волны источника излучения для таких измерений выбирается так, чтобы она была представительной для используемого в работе системы набора длин волн. Полученное в дБ значение вносимых потерь необходимо сравнить с вычисленным значением бюджета линии. Указанные два значения не должны отличаться более, чем на 1 дБ. Измерение затухания может проводиться с помощью калиброванного светового источника и светового детектора на удаленном конце, который также калибруется. В другом варианте можно использовать оптический рефлектометр (OTDR). Его использование будет обсуждаться в гл. 15. Оптический рефлектометр особенно полезен для выявления нерегулярности в коэффициенте затухания, а также позволяет определить дефекты и разрывы волокна в стыках, сростках и оптических разъемах. В особых случаях, когда это определяется техническим персоналом, осуществляющим приемо-сдаточные испытания, может быть полезным проводить испытания на каждом конце линии.

11.4.2. Дисперсия

Если ВОЛС предназначена для транспортировки потоков со скоростями выше 1 Гбит/с, то дисперсия может оказывать значительное влияние на показатели системы, особенно это касается хроматической дисперсии. Как мы отмечали в гл. 1, линия оптоволоконной связи может быть либо из класса ограниченных по потерям, либо ограниченных по дисперсии. При заданной спецификации производителя на волокно, мы можем вычислить аккумулярованную дисперсию, так как нам известна общая длина рассматриваемой линии связи и дисперсионный коэффициент волокна. С другой стороны производитель может заявить, что данное волокно удовлетворяет всем требованиям рекомендаций ITU-T G.652, G.653, G.654 или G.655 (см. гл. 6, разд. 6.6). Тестирование элементов волоконно-оптической системы и системы в целом описано в гл. 15.

11.4.3. Тестирование показателей ошибок

Последней целью тестирования системы в целом является тестирование показателей ошибок. Рекомендация ITU-T G.955 и другие рекомендации серий G.600 и G.900 устанавливают показатель BER на уровне 10^{-10} . Однако, в некоторых документах предлагают использовать величину $BER=10^{-12}$. Мы остановимся, вслед за компанией Sprint (США), на этом значении BER.

Сколько времени мы должны ждать появления первой случайной ошибки, когда мы проводим тест на подтверждение такого жесткого значения показателя BER (как 10^{-12}). При скорости SDH/SONET в 10 Гбит/с для достижения значения $BER=10^{-10}$ мы должны иметь 1 битовую ошибку на 10^{10} бит, которые при этой скорости мы передадим за 1 с. При $BER=10^{-12}$ мы наработаем такую ошибку за 100 с.

Если мы уменьшим скорость, скажем до 2,5 Гбит/с, то в первом случае это время составит 4 с, во втором 400 с, при скорости 1 Гбит/с — 16 с и 1600 с соответственно. При таком хорошем показателе измерения должны про-

водиться очень тщательно, что сделать довольно трудно, так что могут быть использованы другие, более разумные величины.

В качестве верхнего порогового значения ITU-T используют $BER=10^{-3}$. Это значение восходит к телефонной сигнализации. Если значение BER будет хуже, чем 10^{-3} , то в телефонном канале произойдет выпадение сигнала и пользователь услышит тон набора номера. Учитывая, что 50% трафика в телефонной сети общего пользования приходится на голос, можно ставить вопрос о таком значении BER. Может быть значение $BER=10^{-6}$ было бы более приемлемым? По крайней мере оно больше удовлетворило бы тех, кто передает данные.

11.5. Подводные кабельные системы

Длинные подводные ВОЛС представляют довольно деликатные проблемы для проектировщиков. Оставляя в стороне тот факт, что в этих условиях требуется специальный тип кабеля, для предотвращения порчи кабеля за счет коррозии в морской воде, или специальные меры, для предотвращения возможности случайно зацепить его каким-нибудь тралом, принципиальным моментом, характеризующим проект является *доступность* системы. Доступность системы и средства ее измерения обсуждаются в гл. 12. Мы должны максимизировать *показатель доступности* системы до величин порядка 99,99% и лучше. Однако наше обсуждение здесь сфокусировано, главным образом, на наземных системах. Подводные системы передачи — это особый тип систем и проблем.

Первое неудобство — доступ к подводным ВОСП затруднителен и дорог. Требуется использовать специальные суда. Процедура доступа может занять много дней. Более того во всем мире не найдется больше 40 судов, обслуживающих такие системы во всем мире.

11.5.1. Меры по улучшению доступности

Ниже перечислены некоторые меры, которые должны быть приняты, для того, чтобы довести доступность таких систем до «многих девяток» (например, 99,9999+):

- для всей подводной части системы передачи необходимо использовать элементы, подсистемы и системы улучшенной и высокой надежности; тестирование надежности должно привлечь во внимание подводное окружение (напр., давление воды и ее соленость);

- необходимо использовать избыточность (резервирование) во всех стратегических точках;

- где возможно, необходимо использовать дублирование трасс, а также организовать резервирование темных волокон в альтернативных системах других операторов, на случай аварий основных систем; другой возможностью для альтернативных трасс являются спутниковые системы связи;

- везде, где возможно, необходимо использовать кольцевые архитектуры с режимом защитного переключения в течение миллисекунд и меньше.

Руководство по волоконной оптике ITU-T [11.2] рекомендует следующее. Независимо от специфических кабельных характеристик от проекта к проекту, существует несколько основных критериев, которые должны выполняться для всех подводных оптических кабелей:

- а) срок службы системы должен быть не менее 25 лет;

- б) система должна иметь медные жилы с малым омическим сопротивлением и высокой изоляционной прочностью для дистанционного питания повторителей (регенераторов);

- в) система должна иметь необходимую прочность и степень защищенности, достаточную для того, чтобы иметь возможность безопасной укладки и восстановления кабеля в неблагоприятных погодных условиях, используя обычные методы обработки на судах;

г) система должна противостоять предполагаемым угрозам со стороны подводного окружения;

д) система должна обеспечить такую конструкцию кабеля, которая защищает волокна от избыточного натяжения, давления, проникания воды и водорода;

е) необходимо быть уверенным, что в случае полного разрыва кабеля, его конструкция ограничит доступ воды и минимизирует генерацию водорода;

ж) обслуживающий персонал должен сделать возможным быстрое размещение эффективных и надежных средств для ремонта кабеля в море [11.1].

ГЛАВА 12 ДОСТУПНОСТЬ И БЕЗОТКАЗНОСТЬ СИСТЕМ

12.1. Важность показателей доступности и безотказности

В первые годы использования ВОК, показывались такие кадры: кабель зарыт в землю, трасса проходит через поле фермера. Фермер вспахивает поле, плуг цепляется за кабель и рвет его. Сервис, обеспечиваемый оператором связи по кабелю, нарушается. Работы по восстановлению займут по крайней мере день. Что делать?

Сегодня такой кабель, скорее всего, не пересекал бы поле фермера из-за сложностей получения права прохода. Однако, ВОЛС все еще уязвима и серьезность ситуации осталась, возможно благодаря существованию экскаваторов у строительных рабочих. Тот, кто работал в промышленности, использовал общий термин для описания ситуации с обрывом кабеля — «пострадавший от экскаватора». В настоящее время вместо обрыва сотен каналов, мы оборвем десятки тысяч каналов, что может привести к ужасным потерям для государства, компаний и пользователей.

Другой вариант ухудшения связи по кабелю — это отказ или деградация элементов или узлов кабельной системы, например, потеря мощности волоконно-оптического усилителя. Если активные элементы ВОСП теряют свой источник мощности, это приводит к отказу. Другой важный момент, который мы обычно не замечаем — это системная синхронизация и таймирование. Например, если происходит смещение фазы тактовой последовательности более чем на половину битового интервала, то система, в сущности, прекращает функционировать.

Наша цель в том, чтобы убедить пользователя установленной ВОСП, что система останется работоспособной и с определенной вероятностью будет удовлетворять поставленным целям. Эта вероятность будет основана на наших возможностях и на возможностях системы оставаться

функционирующей определенное и довольно большое (в процентном отношении) время. При расчете этого времени принимают во внимание вероятность отказа элемента, то, как быстро система может быть восстановлена после отказа элемента, и то, как быстро она может быть возвращена к нормальному сервису после катастрофического отказа.

12.1.1. Определения доступности и безотказности

Определим *безотказность* как понятие, характеризующее, насколько хорошо система может противостоять катастрофическим событиям. Мы имеем ввиду обрыв кабеля в одном месте. Тогда *доступность* будет означать процент от общего времени (например, длиной в год), в течение которого система работоспособна. Определим, формально, доступность, как «возможность для элемента выполнять требуемые функции в течении установленного периода времени (при определенных условиях, наложенных на надежность, ремонтпригодность и поддержку обслуживания), или как отношение времени безотказной работы к полному времени работы и обслуживания» [12.1]. Доступность обычно выражается в процентах (например, 99, 993%).

Другой термин, который мы будем использовать - *недоступность*. Если доступность определенной ВОСП равна 99,997, то чему равна недоступность? Это просто, она равна (1-доступность), т.е. в нашем случае, $1 - 99,997 = 0,003\%$. Если это недоступность, то что такое *простой* в расчете на год? Один год - это 8760 часов, $8760 \times 0,00003 = 0,2628$ часов или 15,768 минут.

Доступность часто выражается формулой:

$$A\% = [MTBF/(MTBF + MTTR)] \times 100, \quad (12.1)$$

где MTBF — *время между отказами*, измеренное в часах, а MTTR — *среднее время ремонта*, измеренное в часах.

Следующий пример объясняет использование уравнения 12.1. Предположим, что MTBF некоторого волоконно-оптического усилителя (ВОУ) - 10000 часов и что MTTR равно 1 часу. Вычислим доступность ВОУ:

$$A\% = [10000/(10000 + 1)] \times 100 = 99,990001\%$$

MTBF является популярной мерой надежности. Другой мерой надежности является FIT, расшифровываемая, как «число отказов за определенный промежуток времени». Обычно это число отказов за 10^9 часов.

В формуле (12.1) наиболее трудным параметром для вычисления с большой степенью вероятности является MTTR. В MTTR включаются: а) время достижения места отказа, б) время поиска неисправностей: дефектной части, узла, карты. Время, требуемое технику-ремонтнику понять, где можно достать запасную карту для замены (в местном или центральном складе). Для центрального склада мы должны включить в MTTR время доставки карты в место отказа, время ее замены и тестирования, затем время восстановления сервиса на линии после ремонта.

Допустим, что нужной карты не было на центральном складе и она должна быть заказана у изготовителя. В этом случае потребуется день или даже неделя для ее доставки на нужное место.

Ниже мы рассмотрим MTBF, MTTR и доступность более подробно.

Существует ряд путей сделать этот процесс более эффективным. Один из них состоит в том, чтобы уменьшить номенклатуру используемых деталей, узлов, карт, 2) обеспечить избыточность на уровне схмотехники в тех местах, где имеется плохая статистика отказов. Нужно также использовать светодиодную индикацию или другие средства визуального контроля, показывающие линейные карты с цветовой индикацией (например, красным цветом) тех карт, которые требуют замены. Большинство из этих *схем встроенного контроля* (VITE) построено по типу «работает» — «не работает».

12.1.2. Безотказность и форс-мажорные обстоятельства

Большинство контрактов на установку систем написаны так, что включают параграф, описывающий «форс-мажорные обстоятельства». *Форс-мажор* - легальный термин, означающий действие стихийных сил природы, которые могут представлять лесной пожар, ураган, землетрясение,

извержение вулкана, наводнение, лавину. Эти жестокие возмущения могут разрушить ВОСП на большом участке. Подобные разрушения могут потребовать недели и месяцы для их полной ликвидации и восстановления работоспособности системы. Многие аспекты требуют анализа доступности системы, но все они допускают форс-мажорные обстоятельства. Другими словами, при вычислении доступности системы мы не должны учитывать выход системы из строя из-за форс-мажорных обстоятельств. Это одно из любимых «выходов из строя» для подрядчика, так как такие губительные для системы условия не могут быть предсказаны.

Существуют много действий, которые подрядчик может предпринять либо изучая действие форс мажорных событий, либо устраняя результаты разрушений. Кабель, зарытый в землю может противостоять этим событиям лучше, чем кабель, подвешенный на опорах. Но даже в этом случае кабельные колодцы должны иметь резервные петли для устранения излишнего натяжения кабеля. Это особенно необходимо в случае устранения последствий землетрясения. Для устранения таких последствий могут быть использованы и другие меры. В комнатах, где установлено оборудование, или в удаленных аппаратных, стойки монтируются к полу и потолку, используя резиновые или эластичные крепления для гашения толчков. Эти помещения сами по себе должны быть сделаны устойчивыми к землетрясениям.

Другой важной мерой является добавление специальных механических креплений при пересечении водных преград для предотвращения последствий весенних паводков, наводнений и движений ледяных масс. Прокладчики ВОЛС должны укладывать кабель в траншею или кабелеукладчиком с плугом на высоких местах, где нельзя ожидать наводнений.

12.1.3. Определение отказа канала

Стандарт Telcordia TSGR [12.6] так определяет *выход канала из строя* (отказ): «Канал цифровой передачи считается недоступным, или в

находящимся в состоянии простоя, если его показатели ошибок падают ниже заданного порога и остаются ниже этого порога в течении некоторого времени». Это определение основано на рекомендации ITU-T G.821 (см. также G.826), которая частично цитируется ниже:

Период *времени недоступности* начинается тогда, когда коэффициент битовых ошибок (BER) в каждой секунде хуже, чем 10^{-3} , для периода в 10 последовательных секунд. Эти 10 секунд включаются в *период времени недоступности*.

Время недоступности начинается с первой *секунды с серьезными ошибками* (SES) в передаваемой последовательности. В дополнении к этому:

Период *времени недоступности* заканчивается тогда, когда коэффициент битовых ошибок (BER) в каждой секунде лучше, чем 10^{-3} , для периода в 10 последовательных секунд. Эти 10 секунд включаются в *период времени доступности*.

Время доступности начинается с первой секунды в передаваемой последовательности, в которой нет ошибок. Следовательно, недоступность, или время простоя канала, начинается тогда, когда наблюдается первая из 10 последовательных *секунд с серьезными ошибками*, после последовательности, где такие ошибки отсутствовали. SES — является секундой, в которой $BER > 10^{-3}$. Эти определения относятся ко всем случаям деградации, влияющим на показатели ошибок канала, включая отказ (незащищенных) каналов и другие факторы, вносящие свой вклад в ухудшение показателей [12.6].

12.1.4. Показатели доступности короткой секции (Telcordia)

Для короткой секции Telcordia устанавливает показатели доступности на уровне 99,98% (недоступность - 0,02%) в 400 км двусторонней широкополосной линии. Будучи переведенными во время простоя, эти показатели дают 105 минут в год. Для систем с протяженностью меньше 400 км время простоя сокращается линейно с коэффициентом 0,26 мин/год/км.

Для конфигурации DS3 показатели доступности для интерфейсов DSX-3-DSX-3 принимаются равными 0,75 от указанных для канала DS1: 79 мин/год/V83 канал для систем с 400 км трактом.

Для конфигураций систем с длиной тракта короче, чем 400 км, время простоя уменьшается линейно с коэффициентом 0,2 мин/год/км. Из них 75% отводится на среду передачи и 25% — на терминалы и регенераторы.

12.1.5. Ссылки на стандарты по надежности электронного оборудования и систем

Среди специалистов по надежности существуют три приемлемые ссылки. Они включают MIL-STD-217E [12.2] и Telcordia TR-332 [12.3], если вопросы касаются надежности оборудования, и GR-929-CORE [12.4], если вопросы касаются измерений надежности/доступности телекоммуникационных систем. Для ВОСП они включают также ITU-T G.911 [12.5].

12.1.6. Основные требования для систем передачи (TSGR): оценка надежности оборудования

Существуют три приемлемых метода вычисления надежности оборудования:

Метод I относится к методам «суммирования показателей составляющих частей», когда оценка интенсивности отказов всего оборудования равна сумме интенсивностей отказов составляющих его частей. При этом могут быть использованы различные уровни нагрузки (см. MIL-STD-217E [12.2]). Они называются у Telcordia *коэффициентами качества устройств*. Интенсивности отказов приборов могут меняться при изменении температурных условий и факторов, вызванных электрической нагрузкой. Если фактические рабочая температура устройства и уровни нагрузки прибора неизвестны, то предполагается, что приборы работают при 40°C и 50% номинальной электрической нагрузке. Фактор окружающей

среды применяется к показателю интенсивности отказов блока в случае, если он применяется в условиях окружающей среды, отличных от стандартных.

Метод II объединяет данные, полученные при лабораторном тестировании с тем, что дают оценки по методу I. Интенсивность отказов вычисляется как взвешенное среднее измеренной интенсивности отказов и суммы известных интенсивностей отказов составляющих частей, при условии, что весовой коэффициент определяется уровнем доверия к лабораторным данным. Программа оценки надежности (RPP) дает информацию типа: «сколько устройств или блоков нужно тестировать», «как долго должно проходить тестирование» и «как они должны тестироваться».

Метод III основан на статистических оценках фактических, полученных в процессе эксплуатации, данных программы исследования надежности. Такие параметры, которые существенны для оценки интенсивности отказов тщательно контролируются в этой программе, результат зависит от опыта в оценке надежности тех, кто фактически оперирует оборудованием в условиях естественной эксплуатации. Эти параметры включают число изучаемых блоков, число блоков получивших отказ, временной интервал, в течение которого исследовался каждый блок, и оценку статистической точности той оценки, которая получена для интенсивности отказов. Как можно ожидать, исследуемые образцы и окружающая среда должны соответствовать продукту, находящемуся в эксплуатации. Если этого нельзя воспроизвести, то нужно использовать аналитический подход для достижения необходимой коррекции. В процессе анализа/изучения должен учитываться каждый исследуемый блок. Если зафиксирован отказ, то нужно быть внимательным при подтверждении каждого такого отказа. Нужно делать различие между блоками дефектными изначально, блоками, отказавшими в начале срока службы, и блоками с большим сроком службы, отказавшими во время эксплуатации. Мы должны быть также уверены, что были зарегистрированы все случаи отказов.

Следует использовать рекомендацию ITU-T G.911 [12.5] для

вычисления доступности ВОСП. Однако, наш подход ниже в значительной степени упрощен. Он описан в следующих разделах.

12.2. Взаимосвязь показателей надежности

FIT — это сокращение от Failure In Time - *число отказов за определенное время*. Оно определяется числом отказов за 10^9 часов. Для того, чтобы получить из него число отказов за 10^6 часов, достаточно умножить на 10^{-3} . В большинстве работ для *интенсивности отказов* блоков, устройств или систем в целом используется обозначение λ . Если мы измеряем λ , как число отказов за миллион часов, то нам достаточно взять обратную величину, чтобы получить эквивалент величины MTBF. Если устройства соединены последовательно, то интенсивность отказов такой конфигурации равна сумме интенсивностей отказов составляющих ее устройств.

Если интенсивность отказов измеряется в FIT (F), то MTBF (M) равна

$$M = (1,14 \times 10^5) / F, \quad (12.2)$$

где M измеряется в годах на отказ.

Первый пример, требуется вычислить MTBF схемного модуля. Суммируем интенсивности отказов каждого из составляющих его элементов. Пусть он состоит из:

| | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 1 интегрированного узла | FIT/элемент = 1500 | всего в FIT = $1500 \times 1 = 1500$ |
| 6 интегральных схем | FIT/элемент = 300 | всего в FIT = $300 \times 6 = 1800$ |
| 5 резисторов | FIT/элемент = 123 | всего в FIT = $123 \times 5 = 615$ |
| 8 конденсаторов | FIT/элемент = 57 | всего в FIT = $57 \times 8 = 456$ |
| 1 разъем | FIT/элемент = 27 | всего в FIT = $27 \times 1 = 27$ |
| 1 РСВ (печатная плата) | FIT/элемент = 27 | всего в FIT = $27 \times 1 = 27$ |

итого 4425 FIT

Следовательно, для схемного модуля $MTBF = 1,14 \times 10^5 / 4425 = 25,76$ лет.

Второй пример, серия простых вычислений показателей для ВОСП. Снова суммируем интенсивность отказов для каждого из подключенных сетевых элементов (и другого оборудования, которое не входит в их состав), из которых составлена ВОСП. Для этого примера имеем:

| | | |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 6 канальных модулей | FIT/элемент = 8000 | всего в FIT = 8000×6 = 48000 |
| 5 источников питания | FIT/элемент = 6500 | всего в FIT = 6500×5 = 32500 |
| 5 регенераторов | FIT/элемент = 12050 | всего в FIT = 12050×5 = 60250 |
| 1 плата микропроцессоров | FIT/элемент = 12300 | всего в FIT = 12300×1 = 12300 |
| 1 плата мониторинга | FIT/элемент = 3400 | всего в FIT = 3400×1 = 3400 |

итого 156450 FIT

Следовательно, для системного $MTBF = 1,14 \times 10^5 / 156450 = 0,7286673$ лет = 6383 часа.

Предположим, мы решили, что 6383 часа — это недостаточная надежность. Что можно сделать в этом случае? Один из вариантов — добавить полную резервную линию. Если мы сделаем это с использованием защитного переключения, то можно возвести в квадрат значение MTBF. Это даст надежность в 40 744 292 часа, что выглядит вполне приемлемо.

Другой, более экономичный подход, перевести устройство с худшим значением интенсивности отказов в схему с дублированием 1+1. В нашем случае это системные регенераторы, их всего пять, причем для каждого из них FIT равен 12050. Не погружаясь в сложности Марковских цепей и стохастических процессов, преобразуем FIT в MTBF, возведем вычисленное значение в квадрат, а затем вычислим эквивалентное значение FIT.

Вычислим эквивалентное MTBF для FIT = 12050.

$$MTBF = 10^9 \text{ час} / FIT = 10^9 / 12050 = 82987 \text{ час}$$

$$(82987 \text{ час})^2 = 6,886933765 \times 10^9 \text{ час}$$

$$F = 10^9 / 6,8869 \times 10^9 = 1 / 6,8869 = 0,1452$$

Пересчитаем MTBF с учетом резервирования регенераторов, подставляя $5 \times 0,1452$ в качестве значения, используемого для регенераторов. Общее FIT для системы уменьшится до величины 96201. С учетом этого,

новое значение MTBF будет равно:

$$\text{MTBF} = (1,14 \times 10^5) / 96201 = 1,1875 \text{ года.}$$

Это значение немного лучше того, что было раньше.

Если MTBF измеряется в часах и мы хотим сконвертировать это значение в FIT, то

$$\text{FIT} = 10^9 / \text{MTBF}. \quad (12.3)$$

Если же интенсивность отказов задана в FIT и мы хотим получить эквивалентное значение MTBF, измеренное в часах, то

$$\text{MTBF} = 10^9 / \text{FIT} \text{ (час)}. \quad (12.4)$$

Помните, что в году 8760 часов (24×365).

12.3. Вычисление доступности системы

При наших вычислениях доступности системы, перерывы, вызванные форс-мажорными обстоятельствами, не включаются в период времени простоя системы.

12.3.1. Доступность и недоступность

Предположим, что для какой-то ВОСП доступность принята равной 99,0%. Это значит, что на отрезке длиной в год система будет работоспособной, удовлетворяющей требованиям по BER, в течение $0,99 \times 8760 = 8672,4$ часа. Что же касается оставшейся части года, $8760 - 8672,4 = 87,6$ часов, то в это время можно ожидать, что система не будет удовлетворять требованиям BER, т.е. будет неработоспособной, или *недоступной*. То есть 87,6 часа представляют системную *недоступность*. Если мы представим, что A — это доступность, а U — недоступность, то, зная одно из них, мы можем вычислить другое, а именно:

$$U = 1 - A. \quad (12.5)$$

Например, если недоступность равна 0,01%, чему равна эквивалентная

доступность? Преобразуя проценты в десятичную дробь, получим 0,0001, тогда

$$0,0001 = 1 - A, A = 1 - 0,0001 = 0,9999, \text{ или } 99,99\%$$

Стандартное выражение для доступности имеет вид, см. выражение (12.1):

$$A\% = [\text{MTBF}/(\text{MTBF} + \text{MTTR})] \times 100$$

Предположим, что показатель MTBF терминального мультиплексора равен 50000 FIT, или $10^9/5 \times 10^4 = 20000$ часов и мы изменяем значение MTTR, полагая его равным 30 мин, 1, 2, 4, 6, 8 и 10 час, тогда значение доступности будет таким, как это указано в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Изменение доступности при изменении MTTR и постоянном MTBF = 20000.

| MTTR (часы) | Доступность, % | Комментарий |
|-------------|----------------|--|
| 0,5 | 99,9975 | Готовность ремонтников 24 часа/день, запасные части — немедленно, установлена продвинутая система BITE ^{a)} |
| 1,0 | 99,9950 | Готовность ремонтников 24 часа/день, запасные части - немедленно, хорошая ремонтпригодность ^{b)} |
| 2,0 | 99,9900 | Значение, рекомендованное TSRG для обслуживаемых узлов, таких как центры коммутации ^{b)} |
| 4,0 | 99,9800 | Значение, рекомендованное TSRG для необслуживаемых узлов, допускается 3 часа на дорогу к узлу ^{b)} |
| 6,0 | 99,9700 | |
| 8,0 | 99,9600 | |
| 10,0 | 99,9500 | |

^{a)} BITE (Built-in Test Equipment) - встроенное оборудование для тестирования. Это означает, что есть сигнализация типа «работает», «не работает», позволяющая ремонтникам свести проблему ремонта к замене карты (платы). Эта сигнализация может быть удаленной (на центральной системе управления). Другое усовершенствование может касаться фронтального доступа ко всем точкам тестирования.

^{b)} MTTR = 1 часу, что дает (по сравнению с 30 мин) больше времени на поиск неисправности. Можно предположить, что уровень ремонтпригодности меньше, чем в предыдущем случае.

^{b)} TSGR (Transport System Generic Requirements) - Основные требования к транспортным системам (стандарт Telcordia [12.6]). Этот документ устанавливает 2 часа недоступности для центров коммутации, включая оборудование передачи, установленное в том же здании, что и коммутаторы. MTTR устанавливается равным 4 часам для другого удаленного оборудования. Для ВОСП это могут быть мультиплексоры ADM, питающие телефонный узел, регенератор, оптический усилитель, который находится на кабельной линии.

12.4. Сетевая архитектура и безотказность

Сетевая архитектура может оказывать огромное влияние на доступность системы. Кольцевые топологии применяются почти везде на сетях с секциями большой протяженности. Кольцо состоит из пары или нескольких пар волокон. В одном варианте, по одному из волокон информационный поток идет в одном направлении, по другому в противоположном. На таких сетях, часто взаимодействующих с сетями общего пользования, трафик симметричен. Значительный процент такого трафика обслуживает клиентов телефонных услуг, которые используют полнодуплексный сервис. Другие сервисы обслуживают пользователей Интернет, передачу данных по корпоративным сетям, связь с другими сетями передачи данных типа Frame Relay, IP и ATM. Можно также ожидать, что этот трафик симметричный и полнодуплексный. Некоторые сети передачи видео могут использовать и асимметричный трафик. Телеконференц связь обычно двусторонняя. В разделе 12.4.7 описаны основные кольцевые конфигурации, используемые производителями ВОСП.

12.4.1. Автоматическое защитное переключение (APS)

Транспортные ВОСП, как правило, имеют топологию кольца, для защиты трафика от отказов оборудования. В архитектуре кольца трафик может быть направлен в одном, либо в обоих, направлениях вокруг кольца, состоящего из нескольких узлов. Такая кольцевая топология обеспечивает защиту от отказа промежуточных узлов, хотя трафик начинающийся или заканчивающийся в таком узле не может быть восстановлен, пока не будет обеспечено его резервирование. Если это будет обеспечено, то может оказаться возможным восстановить 100% трафика, следующего через отказавший узел в кольце. *Автоматическое защитное переключение (APS)* дает возможность восстановить трафик.

APS было разработано и определено как для систем, которые

мониторят ухудшение и отказ отдельных каналов или маршрутов, так и для систем, которые мониторят сигнал в целом. Когда установлен факт ухудшения сигнала или отказа системы, то полное соединение, или его часть, например, один канал из всего набора каналов, может быть переключен на резервное оборудование.

12.4.2. Активирование переключения

Защитное переключение в ВОСП активируется тогда, когда ВЕК сигнала на активном волокне (работающей, либо резервной линии) больше, чем порог инициализации переключателя, и доступно резервное волокно, группа волокон, или кабель (либо в защитной конфигурации, либо в исходной работающей конфигурации) с лучшим значением BER. В общем случае порог активации возникает, когда BER находится в диапазоне 10^{-6} — 10^{-9} . Для того, чтобы приспособиться к разным ситуациям, можно сделать значение порога переключаемым. Обычно, в дополнение к этому, система может поддерживать второй порог инициализации переключателя, так чтобы можно было дать приоритет линии с серьезной деградацией сигнала. Вторым порог инициализации переключателя обычно устанавливается в диапазоне BER 10^{-3} — 10^{-4} .

Время обнаружения - время, требуемое для системы управления, чтобы определить, что произошел отказ оборудования, или, что порог BER был превышен, а также для того, чтобы инициировать действие защитного переключения, если это необходимо. Время обнаружения должно быть меньше 10 мс.

Активирование или деактивирование переключения запускается определенной бит-последовательностью в байтах K1 и K2 заголовка SONET, см. табл. 12.2.

Структура кадра (по умолчанию) на основе байтов K1 и K2

| Байт K1 | | | | | | | | Байт K2 | | | | | | | |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|---|---|---|
| X | X | X | X | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | X | X | X | X |

X - может быть любым (1 или 0)

Источники. Таблица основана на ANSI T1-105.01 [12.8] и Telcordia GR-1230 [12.7].

Время завершения переключения, после того, как оно было инициировано, должно быть не более 50 мс. Специалисты по управлению могут осуществить такое переключение вручную. Это означает, что трафик может быть прерван на 50 мс при ручном переключении. Некоторые пользователи, возможно, найдут, что 50 мс - слишком большое время для переключения. Telcordia, поэтому, сформировала определенные требования для ручного переключения. В определенных случаях действие переключателя должны быть безошибочны. Действие ручного переключения предвзвешивает время обнаружения, следовательно, действие по переключению может занять много меньше 50 мс.

12.4.3. Восстановление

Когда BER рабочей линии улучшится, трафик может продолжать передаваться по резервной линии (эта ситуация называется *безвозвратным переключением*), или он может быть переключен назад на рабочую линию (эта ситуация называется *возвратным переключением*). Telcordia рекомендует при этом устанавливать *порог восстановления*, значение которого равно $T/10$ (где T — порог инициализации переключателя, который мы обсуждали раньше).

После того, как BER на рабочей линии станет лучше порога восстановления, начнет отсчитываться *период ожидания восстановления* (WTR) - 5-12 мин, до того, как осуществится возвратное переключение, если только резервная линия на потребуется для других целей, таких как защита

других деградирующих линий. Если резервная линия требуется для других целей, то возвратное переключение, инициируется сразу, как только BER на рабочей линии станет лучше порога восстановления.

Рациональность использования WTR в том, что позволяет исключить частые переключения между рабочей и резервной линиями, которые могут быть вызваны промежуточными отказами. Этот механизм применяется только для автоматического переключения, вызванного отказом или деградацией рабочих линий. Он не применяется после того, как инициированные вручную переключатели были возвращены в исходное состояние, или после отказа или деградации защитных линий.

12.4.3.1. Активация APS-функции

В результате отказа, вызванного обрывом волокна или отказом узла, с помощью кадра, сформированного байтами K1 и K2 в заголовке SONET, активируется APS-функция. В табл. 12.2 показана структура кадра (K1, K2), формируемая по умолчанию. Код APS формируется с помощью бит этих двух байтов (K1, K2).

Байты K1 и K2 для кольца могут быть либо *в нейтральном состоянии*, либо *в состоянии включения*. Если K1/K2 для кольца находятся в нейтральном состоянии, то они имеют следующий смысл:

| | |
|---------------|---|
| K1 (биты 1-4) | 0000 (код отсутствия запроса) |
| K1 (биты 5-8) | идентификатор узла назначения (NODE ID) |
| K2 (биты 1-4) | идентификатор узла источника (NODE ID) |
| K2 (бит 5) | 0 (код короткого маршрута) |
| K2 (биты 6-8) | 000 (код нейтрального состояния) |

Когда байты для кольца находятся в состоянии переключения, то они имеют следующий смысл:

| | |
|---------------|--|
| K1 (биты 1-4) | (статус) код запроса на установление перемычки |
| K1 (биты 5-8) | идентификатор узла назначения (NODE ID) |
| K2 (биты 1-4) | идентификатор узла источника (NODE ID) |

K2 (бит 5) 1/0 (код длинного/короткого маршрута)

K2 (биты 6-8) статус-код (STATUS)

Мы выбрали следующую схему группирования бит в байте K2. Эта схема соответствует *общему критерию формирования байтов K1 и K2*. Для примера показаны только данные байта K2.

Назначение бит байта K2

биты 1-4 указывают идентификатор того узла, который готовит запрос

бит 5 указывает является ли код запроса на установление перемычки в байте
K1 (биты 1-4) кодом запроса на короткий (0) или длинный (1) маршрут

биты 6-8 111 = линейный AIS (сигнал индикации аварийного состояния)

110 = линейный RDI (индикатор дефекта на удаленном конце)

101 = зарезервирован для последующего использования

100 = зарезервирован для последующего использования

011 = избыточный трафик (ET) на резервном канале

010 = установлена перемычка и осуществлено переключение (Br&Sw)

001 = установлена перемычка (Br)

000 = нейтральное состояние

Источник. Данные взяты из [12.7, 12.8].

12.4.4. Надежность и доступность защитного переключения

12.4.4.1. Тихий отказ

Не все отказы афишируются, т.е. приводят к генерации сигнала индикации аварийного состояния (аларма, AIS). Те отказы, которые не афишируются (не показываются как аварийные) системой защитного переключения, которая предохраняет от переключения на резервную линию, называются *тихими отказами*. Эти отказы, вместе с тем, вызывают перерыв сервиса и их регистрация важна. Могут существовать другие отказы резервных линий, генерирующие AIS, или ассоциированные с ними функции управления. Предполагается, что эти отказы будут оперативно скорректированы. Существуют три типа тихих отказов:

1. Отказы общего оборудования, который предохраняет от

переключения всех N сервисных каналов или рабочих линий в системе резервного переключения MXN.

2. Отказы оборудования, которые предохраняют от переключения данного сервисного канала или рабочей линии, но могут быть обнаружены путем завершения финальной стадии переключения.

3. Отказы оборудования, которые предохраняют от переключения данного сервисного канала или рабочей линии, но могут быть обнаружены без завершения финальной стадии переключения.

12.4.4.2. Имитация отказов

Имитация отказов для оборудования защитного переключения является формой профилактического обслуживания. Ее цель - обнаружить проблемы, возникающие при переключении, до того, как они вызовут отказ при переключении. Резервные переключатели проверяются на всех этапах переключения вплоть до финальной стадии. Telcordia, см. [12.6], утверждает, что в цифровых ВОСП отказов, вызванных тихими отказами, должно быть не более 10% от общего числа отказов.

При профилактике отказов применяются следующие правила:

1. Частота проверок должна устанавливаться пользователем.
2. Программа проверки должна включать проверку того, что передача сделана от начала до конца.
3. Программа проверки должна включать проверку того, что приемлемый сигнал обеспечивается до финального переключения передачи.
4. Система переключения должна прекращать программу проверки при отказе сервисной линии.
5. Если проверка переключения дала сбой, то локально должен быть выдан явный сигнал аварийного состояния, причем нужно иметь возможность отключать выдачу такого сигнала, как локально, так и дистанционно.
6. Если проверяющий имеет опцию завершения финальной стадии переключения, то нужно иметь возможность отключать такую опцию, как

локально, так и дистанционно.

7. Если отказ сервиса произошел в результате завершения финальной стадии переключения, то система должна вернуться к режиму нормального функционирования в течение 50 мс [12.6].

12.4.5. Варианты защиты линейных сегментов

12.4.5.1. Вариант защиты линии передачи (1+1)

В этом разделе мы покажем, что защита (1 + 1) очень эффективна для достижения полного резервирования. Этот тип резервирования обычно широко используется в кольцевой архитектуре. В основной конфигурации кольцевой архитектуры трафик от источника одновременно передается по обоим направлениям и решение о переключении между основной и резервной линиями принимается в месте назначения. В этой ситуации только *потеря сигнала* (LOS) или аналогичные AIS требуются для инициализации перехода на резерв, и не требуется никакой информации управления или команд, чтобы перейти между двумя этими состояниями. Предполагается, что после отказа основной линии, ремонтники восстановят ее работоспособность. Вместо того, чтобы вернуть отремонтированную линию назад в состояние «основной линии», она назначается как «новая резервная». Следовательно, имеет место прерывание только одной линии, и процесс ремонта/восстановления не требует второго перерыва сервиса.

Лучший способ конфигурирования 1 + 1 сервиса - расположить резервную линию географически удаленной от основной линии. Это позволяет минимизировать отказы общего типа. В силу простоты такого подхода, он обеспечивает наиболее быстрое восстановление с минимальными требованиями на осуществление сложного мониторинга и специального управляющего оборудования. Однако, это дорого и менее эффективно, с точки зрения использования оборудования, чем использование резервирования типа $N+1$. Это неэффективно, потому что резервное оборудование остается неиспользуемым практически все время, не принося

прибыли.

12.4.5.2. Защита типа N+1

Более эффективное использование резервного оборудования можно получить при использовании метода защиты линии передачи по схеме $N+1$. Этот метод можно рассматривать как расширение рассмотренного ранее метода $1+1$. Учитывая высокую надежность современного оборудования, можно быть уверенным, что на одном маршруте не может случиться два одновременных отказа. Это дает возможность иметь только одну резервную линию на N работающих.

Защита линии передачи $N+1$ делает использование оборудования более эффективным экономически, но требует более сложного управления и не может предложить того же уровня доступности, как при использовании схемы защиты $1+1$. Также трудно провести деление маршрутов на рабочие и резервные [12.8].

12.4.6. Самовосстанавливающееся кольцо (SHR) SONET

Самовосстанавливающееся кольцо SONET состоит из 4 или более сетевых элементов, связанных вместе в последовательность с помощью двух или четырех волокон. Начало и конец этой последовательности замыкаются, образуя кольцо. Сетевые элементы кольца SONET это мультиплексоры ввода/ вывода ADM, позволяющие организовать доступ к кольцу для источников PDH/SDH. Существует предел для числа мультиплексоров, которые могут быть соединены в кольцо. Это число обычно равно 16. Кольцо SHR технологии SONET уже было рассмотрено нами в гл. 9, разд. 9.2.6 и 9.2.7.

Существуют два принципиальных типа кольца SHR: кольцо с переключаемыми линиями и с переключаемыми маршрутами. В кольце с переключаемыми линиями входящий трафик направляется только в одном направлении вокруг кольца, до тех пор пока не произойдет защитное переключение

(неважно какого типа, 1+1 или N+1). Переключение координируется узлами на любой стороне кольца с помощью *протокола сигнализации*. Результирующая типовая (по умолчанию) конфигурация — двунаправленный поток трафика.

В кольце с переключаемыми маршрутами трафик ввода (для мультиплексов ввода-вывода) всегда направляется по обоим направлениям вокруг кольца (конфигурация 1+1). Защитное переключение осуществляется *селектором*. Он выносит свое решение отдельно по каждому маршруту. Результирующая типовая (по умолчанию) конфигурация приводит к однонаправленному потоку трафика, но после того, как было активировано защитное переключение, трафик для некоторых соединений становится двунаправленным. Если используется безвозвратное переключение, то трафик остается двунаправленным.

12.4.6.1. Защитное переключение линейных сегментов в SHR

Кольцо SHR с переключаемыми линиями использует линейный уровень OAM индикации SONET для запуска механизма защитного переключения. Это переключение выполняется на линейном уровне для восстановления трафика после отказа, имевшего место на кольце. Оно не затрагивает маршрутный уровень OAM. Линейный уровень OAM включает дефекты линейного уровня, такие как LOF — *потеря фрейма*, и сигналы обслуживания, такие как AIS-L — *сигналы индикации аварийного состояния на уровне линии*. Между узлами происходит обмен сообщениями сигнализации, которые влияют на координированные действия защитных переключений на уровне линии.

12.4.6.2. Защитное переключение маршрута в SHR

Этот тип архитектуры SHR использует маршрутный уровень OAM индикации SONET для запуска механизма защитного переключения. Это переключение выполняется на маршрутном уровне STS или VT для

восстановления трафика после отказа на кольце. Оно не затрагивает линейный уровень OAM индикации. Маршрутный уровень OAM включает дефекты маршрутного уровня, такие как LOP-P — *потеря указателя на уровне маршрута*, и сигналы обслуживания, такие как AIS-P — *сигналы индикации аварийного состояния на уровне маршрута*. Переключение на каком-то определенном маршруте, не зависит от какого-то другого маршрутного статуса.

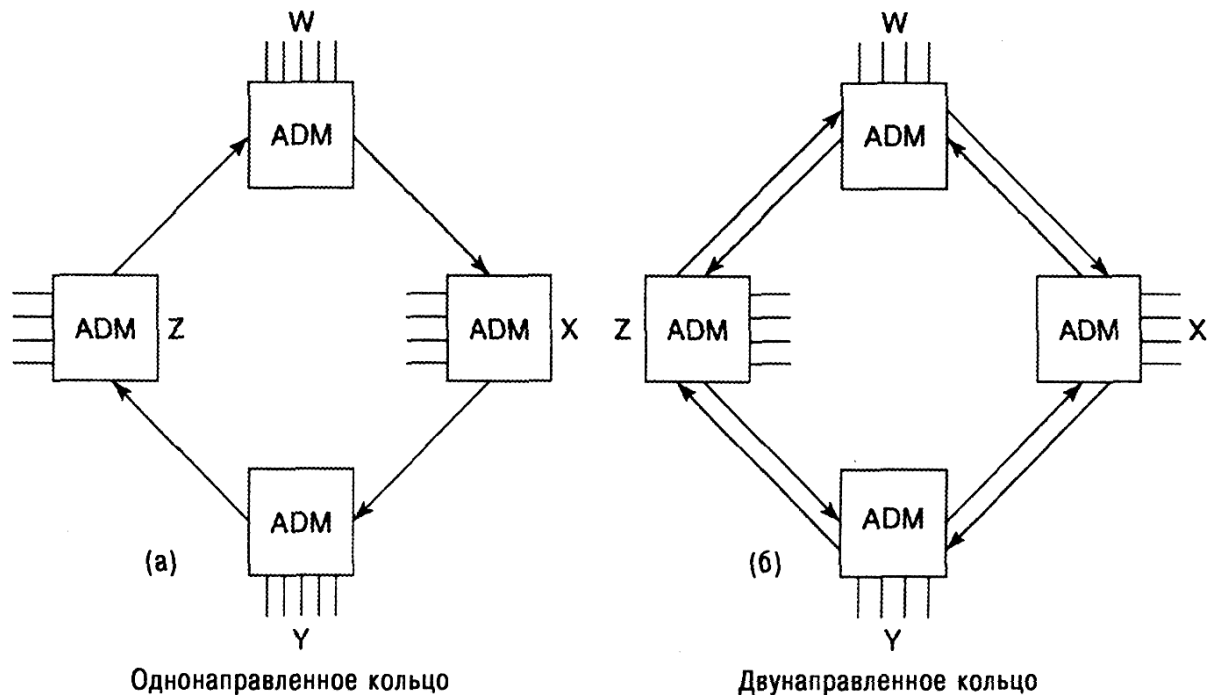


Рис. 12.1. Различие между однонаправленным (а) и двухнаправленным (б) кольцами SONET. (ADM — мультиплексор ввода-вывода)

Здесь мы имеем дело с реализацией двойного *однонаправленного кольца с переключаемыми маршрутами (UPSR)* [12.10]. В этом типе SHR оба направления рабочего трафика между любым узлом кольца А и любым другим узлом кольца В распространяются по кольцу с одним волокном в том же направлении вокруг кольца, прибывая в пункты своего назначения по различным маршрутам. Это означает, что каждый из этих маршрутов проходит через различные узлы кольца. Второе кольцо переносит дубликат (копию) маршрутного сигнала в противоположном направлении вокруг того же

кольца. Следовательно, мы имеем дело с «двойным питанием от одного сигнала», или вариантом защиты 1+1, так как дублирующая информация передается в обоих направлениях того же самого кольца. Это означает, что полная емкость одного кольца защищает полную емкость другого кольца. На выходном (для трафика) узле мы можем ожидать наличие двух сигналов (по одному с каждого направления), из которых можно выбирать. Если произойдет обрыв в таком кольце, например на сегменте между узлами X и Y на рис. 12.1, выходной узел W переключает трафик на резервный маршрут для восстановления исходного маршрута. Выходной узел Y не затрагивается обрывом, поэтому нет необходимости переключать маршрут.

Следует заметить, что переключение маршрута в UPSR осуществляется на одном конце. Здесь это означает, что защитное переключение выполняется только на выходном узле — без какой-либо координации с входным узлом, или его уведомлением. Более того, следует заметить, что эта архитектура изменяется: из кольца она превращается в линейную цепь, если происходит обрыв в кольце (в обоих направлениях). Однако сервис поддерживается и после того, как произошел обрыв. То есть, узлы кольца не принадлежат больше к кольцевой топологии, после того как произошел обрыв в кольце или потеря узла. Когда имеет место такой дефект, то узлы кольца фактически начинают работать в режиме двусторонней передачи. Кроме этого, следует заметить, что кольцо могло бы быть сконфигурировано для работы в режиме двусторонней передачи сигнала при нормальном функционировании и иметь режим односторонней передачи во время отказа.

12.4.7. Конфигурация кольца

Кольцевая сеть состоит из сетевых элементов, соединенных последовательно по схеме точка-точка, так что формируется непрерывная кольцевая конфигурация, как показано на рис. 12.1. Следует понимать, что основной причиной для реализации кольца с переключением маршрутов является необходимость улучшения безотказности сети. Кольцевая структура

обеспечивает защиту от обрыва волокна и отказов оборудования.

Ряд названий используется для того, чтобы описать функциональные особенности кольца с переключением маршрута, например, *однонаправленное кольцо с защитным переключением маршрутов (UPPS)*, *однонаправленное кольцо с переключаемыми маршрутами (UPSR)*, *однонаправленное кольцо и левовращающее кольцо*.

Кольцевая архитектура может быть рассмотрена как класс архитектур, хотя мы анализировали ее концептуально в терминах защиты 1+1. Обычно, рассуждая о кольцевой архитектуре, мы думали о наличии разных маршрутов; и, действительно, существуют два отдельных маршрута связи, идущие вокруг такого кольца. Кольцевая топология является наиболее популярной в среде тех, кто занимается ВОЛС дальней связи. Она предлагает то, что называется *географической разнесенностью маршрута*. Здесь мы имеем ввиду то, что если диаметр кольца достаточно большой (например, больше 16 км), то существует большая, в смысле статистики, вероятность, что по крайней мере одна сторона кольца уцелеет в результате лесных пожаров, больших наводнений, ураганов, землетрясений и других форс-мажорных обстоятельств. Это также означает, что мы предполагаем, что только одна сторона такого кольца номинально пострадает от отказа оборудования или гибели от экскаватора.

Существуют некоторые формы кольцевой топологии, использованные в гибридных медно-волоконных системах кабельного ТВ, но они используются больше для достижения экономической эффективности соединения, чем как средство увеличения выживаемости. Кольца не используются в СКС внутри зданий и не являются обязательными в корпоративных ВОЛС.

Существуют две основные SHR-архитектуры в SONET: односторонняя и двусторонняя. В зависимости от схемы организации трафика и некоторых других факторов, некоторые типы кольцевой архитектуры лучше подходят к одним приложениям, чем другие. Различия одностороннего и двустороннего

типов колец показаны на рис. 12.1. В одностороннем кольце операционный трафик переносится по кольцу только в одном направлении. Например, трафик, проходящий от узла W к Z , будет проходить мимо узлов кольца только по часовой стрелке, точно также, как и трафик, проходящий от узла Z к W . Рабочая емкость однонаправленного кольца определяется полными потребностями в трафике между любой парой узлов.

В случае двунаправленного кольца, трафик идет вокруг такого кольца в обоих направлениях, используя два параллельных маршрута между узлами. (Эти маршруты проложены в различных волокнах одного и того же ВОК.) Для примера, приведенного выше, трафик, проходящий от узла W к Z , проходит по часовой стрелке мимо промежуточных узлов кольца X и Y , а трафик, проходящий от узла Z к W , возвращается далее по тому же маршруту через те же промежуточные узлы X и Y (основная особенность такого кольца в существовании двух альтернативных маршрутов «восточного» и «западного», которые могут отличаться длиной пути).

Другая особенность двунаправленного кольца в том, что трафик в обоих направлениях передачи между узлами проходит через тот же самый набор узлов. В отличие от тайм-слота (здесь и ниже под тайм-слотом понимается емкость на уровне ОС-1) однонаправленного кольца, тайм-слот двунаправленного кольца может быть повторно использован несколько раз на том же кольце, что позволяет лучше использовать емкость кольца. Все узлы на этом кольце используют ту же самую резервную/защитную полосу (емкость кольца), вне зависимости от количества повторного использования какого-то тайм-слота. В больших кольцах, где задержка распространения может вызвать проблемы, существует механизм, обеспечивающий использование кратчайшего пути (при нормальных условиях маршрутизации) в каждом из направлений распространения трафика (не путайте понятие тайм-слота, введенное выше автором, с общепринятым понятием там-слота, как канального временного интервала при временном мультиплексировании. В этом случае тайм-слот эквивалентен каналу емкостью 64 кбит/с.).

12.4.7.1. Однонаправленное кольцо с переключением маршрута (UPSR)

Этот тип кольца (SONET UPSR) показан на рис. 12.1 (левый рисунок). UPSR обеспечивает избыточную емкость для защиты узлов, осуществляющих сервис сообщений, от отказа или деградации сигнала. Основной защиты в кольце UPSR является *установка перемычки* (на входном узле) для направления одинаковых STS/VT сигналов в обоих направлениях вокруг кольца. На выходном узле происходит отбор лучшего сигнала (из двух направлений). Решение о том, какой сигнал будет отобран, основано на использовании сигналов индикации STS и VT на уровне маршрута. Другими словами, UPSR использует механизм 1+1 APS, но только на уровне маршрута. Отсюда и название — «с переключением маршрута». Линейный механизм 1+1 APS, описанный в разд. 12.4.5.1, работает на линейном уровне. Сигналы индикации на маршрутном уровне, используемые для форсирования переключения, формируются по факту деградации сигнала, оборудования и возникновения дефектов.

В нашем случае термин однонаправленный имеет два значения:

1. Начальную конфигурацию UPSR, такую что прямой и обратный маршруты проходят по кольцу в том же самом направлении. Предположим, что определенный маршрут начинается в узле Y на рис. 12.1(a). Он проходит в направлении часовой стрелки и заканчивается на узле Z (см. тот же рис. 12.1(a)). Так как мы имеем дело с полнодуплексными схемами, то обратный маршрут от Z к Y будет нормально нести трафик обратного направления.

2. Переключение маршрута в кольце UPSR осуществляется с одного конца. Если защитный переключатель оперирует на выходном узле, то обычно противоположный конец маршрута не принуждается к исполнению операции защитного переключения. В результате этого, переключение действует только на одном конце цепи. Отсюда смысл значения *однонаправленный*. В этом заключено одно из преимуществ. Различные узлы, через которые любые маршруты подвергаются действию, вызванному

отказами оборудования или ВОК, не обязаны взаимодействовать друг с другом. Это делает архитектуру UPSR значительно проще, чем BLSR.

Такая (BLSR) кольцевая сеть показана на рис. 12.1. Это двухволоконное *двунаправленное кольцо с переключением линейных сегментов BLSR*. Эта архитектура кольца также проходила под именами *однонаправленного кольца с переключением маршрутов (UPSR), однокольцевой архитектуры, левовращающего кольца*.

12.4.7.2. Двунаправленное кольцо с переключением линейных сегментов (BLSR)

Как видно из рис. 12.2, существуют двухволоконные и четырехволоконные BLSR. Четырехволоконные конфигурации BLSR приведены на рис. 12.2(б). Они могут рассматриваться как два отдельных, но параллельных, кольца передачи. Рабочий трафик передается по одному кольцу, а резервный (защитный) трафик ~ по другому. Разделение рабочего и резервного трафика по различным волокнам позволяет использовать *переключение пролетов*. Пролет состоит из пучка линий SONET между двумя смежными на кольце узлами.

Переключение пролетов. В четырехволоконном BLSR рабочие и резервные каналы передаются по различным линиям. Следовательно, четырехволоконное кольцо может использовать схему защиты, аналогичную схеме защитного переключения 1+1 для отдельных пролетов/сегментов. Для тех отказов, которые влияют только на рабочие каналы, таких как обрыв одного волокна, восстановление может быть обеспечено путем переключения рабочих каналов на различные линии, несущие резервные/защитные каналы на том же пролете/сегменте. Фактический протокол для переключения пролета/ сегмента является частью протокола BLSR и отличается от протокола, используемого в системах APS топологии точка-точка. Переключение пролета/сегмента неприменимо к четырехволоконным BLSR.

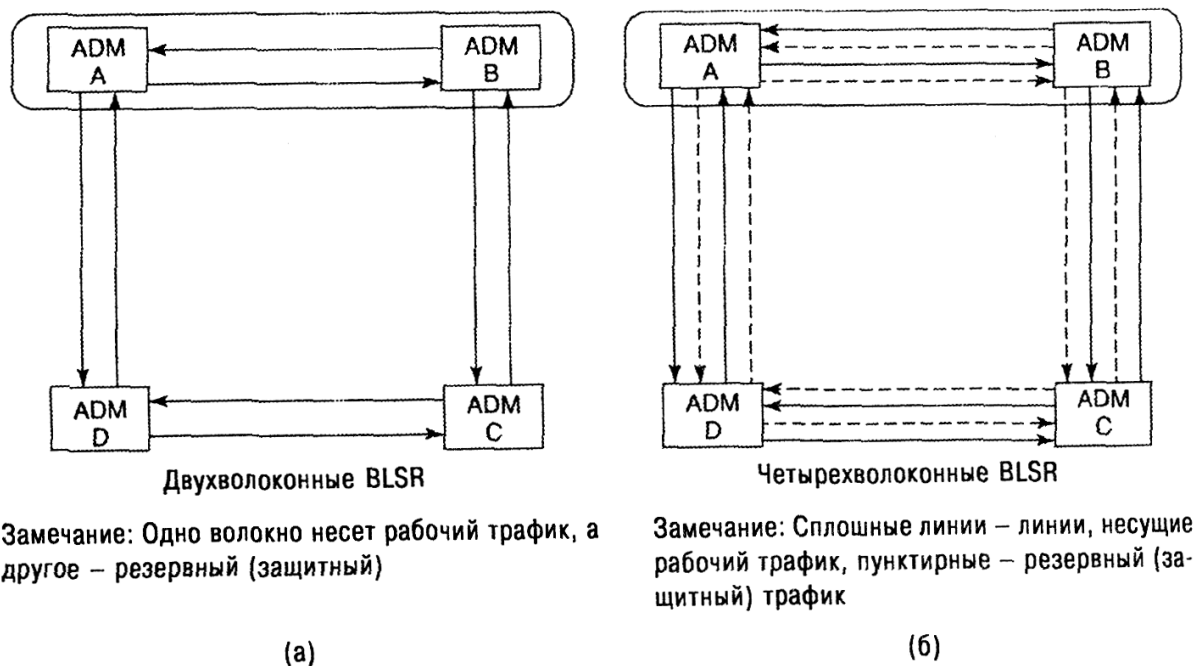


Рис. 12.2. Двухволоконные (а) и четырехволоконные (б) конфигурации колец BLSR.

Четырехволоконное кольцо BLSR, работающее на скорости OC-N, имеет емкость пролета OC-N, тогда как двухволоконное кольцо BLSR, при той же скорости, только $(OC-N)/2$. Однако четырехволоконное кольцо BLSR требует больше электронного оборудования для работы.

Для двухволоконного кольца BLSR оба направления передачи используют тот же самый набор узлов при нормальных условиях эксплуатации. Действие защитного переключения инициируется на основе показателей качества передачи на каждом сетевом элементе (NE). Ненормальные условия функционирования отслеживаются появлением сигнализации типа: LOS -потери сигнала или ухудшения BER. Как для кольца BLSR, так и для кольца UPSR, существует возможность отключить функцию защиты, для пропуска по ним незащищенного трафика. В этом случае для создания защиты (например, для оборудования пользователя) можно использовать схему защиты между конечными точками.

Проектировщик системы может выбрать конфигурацию BLSR, как наи-

более экономную, для тех приложений, которые имеют циклическую схему организации трафика или ячеистую сеть. При циклической организации трафика запросы существуют только между соседними узлами. В ячеистой цепи все узлы должны рассматриваться равноправными с точки зрения запросов, т.е. запросы существуют со стороны всех узлов. Помните, что емкость двухволоконного кольца BLSR может быть вдвое больше, чем у кольца UPSR (при той же скорости данных). Емкость четырехволоконного кольца BLSR может быть вчетверо больше, чем у UPSR, в зависимости от специфики ситуации и характера трафика. Двухволоконное кольцо BLSR показано на рис. 12.3.

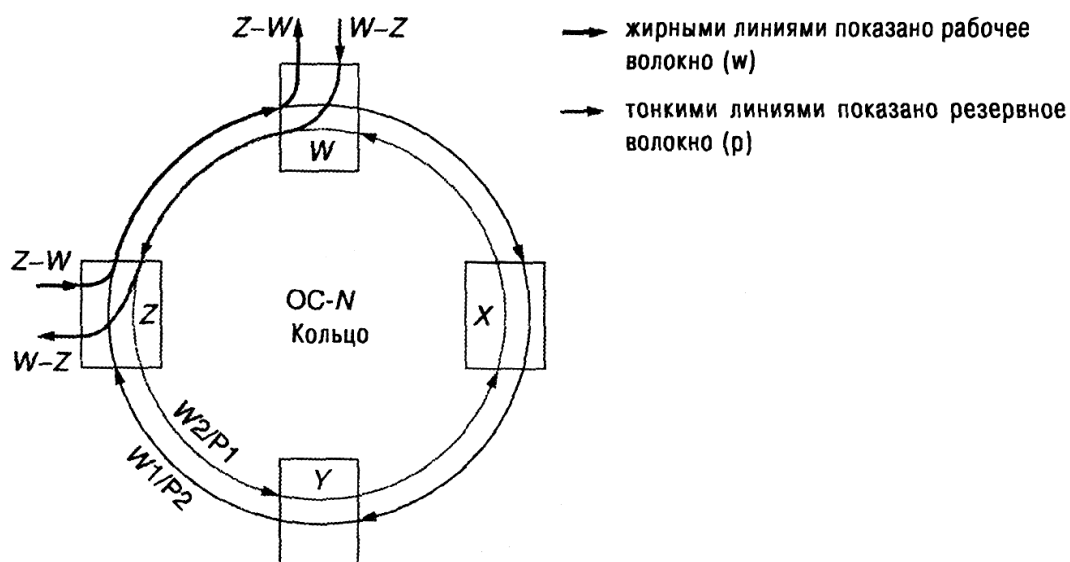


Рис. 12.3. Типичное двухволоконное кольцо BLSR

В случае двухволоконного кольца BLSR (2F-BLSR) ни одно из волокон не назначается специально в качестве резервного. Переключение осуществляется путем использования нечто похожего на выбор тайм-слота, где каждый рабочий тайм-слот предварительно назначается резервным тайм-слотом в противоположном направлении и потому не может быть назначен пользователем.

Двухволоконное кольцо BLSR может обеспечить максимум восстановления там, где существует 100% восстанавливаемый трафик для одиночных отказов, когда 50% емкости кольца резервируется для защиты.

Это приводит к емкости пролета $(OC-N)/2$. Рассмотрим пример двухволоконного кольца BLSR. Мы имеем 24 тайм-слота между узлами W и X для рабочего трафика и 24 тайм-слота между узлами W и X для резервного трафика.

Информацию об активации защитного переключения в SONET несут байты K1 и K2 в заголовке на резервных линиях. Когда происходит отказ, узлы, граничащие с отказавшим сегментом, выполняют функции переключения кольца. Отказавший сегмент может состоять из пролета одного или нескольких узлов. В случае двухволоконного кольца BLSR, работающего на скорости OC-N, тайм-слоты с 1 по $N/2$ будут нести рабочие каналы. Тогда тайм-слоты с $(N/2)+1$ по N резервируются под каналы защиты. Тайм-слот номер X первого волокна будет защищен тайм-слотом номер $X+(N/2)$ второго волокна в противоположном направлении, здесь X — целое число между 1 и $(N/2)$.

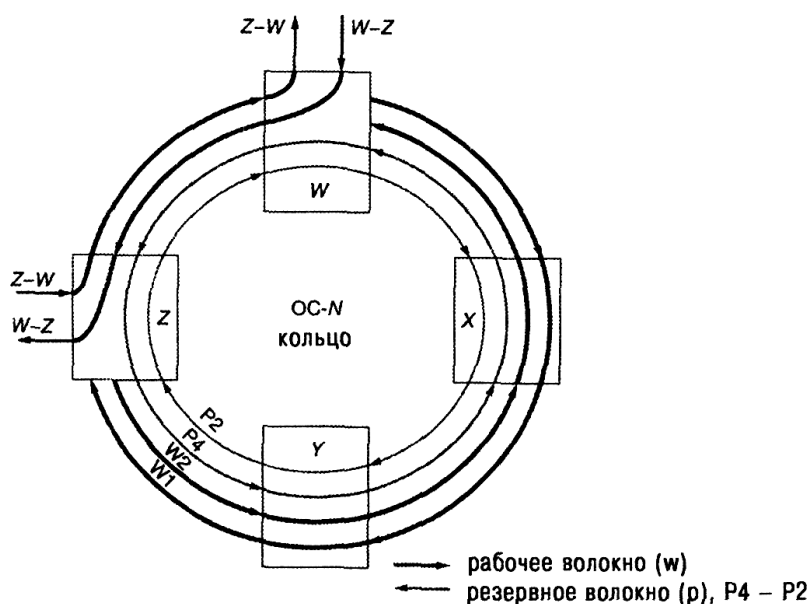


Рис. 12.4. Типичное четырехволоконное кольцо BLSR (4F-BLSR) с линейным переключением.

На рис. 12.4 показано четырехволоконное кольцо BLSR. Этот тип кольца состоит из набора узлов, соединенных с двумя парами волокон. Эта конфигурация может включать: БОУ и/или регенераторы для формирования

замкнутого кольца. В случае четырехволоконного кольца BLSR (4F-BLSR) рабочие и резервные каналы сформированы на различных волокнах. Это позволяет организовать две формы защитного переключения для улучшения доступности сервиса.

Защита трафика на уровне STS инициируется на основе анализа состояний, обнаруженных сетевыми элементами (NE) на линейном уровне. В двухволоконном двунаправленном кольце, защита обеспечивается резервированием некоторой емкости на каждом волокне. Переключение осуществляется путем использования механизма выбора тайм-слотов, где каждый рабочий тайм-слот предварительно назначается тайм-слотом резервного канала, идущего в противоположном направлении. В кольце BLSR SONET, когда NE осуществляют операцию переключения, весь защищенный трафик, с некоторого узла, начинает двигаться в противоположном направлении. Двунаправленные кольца обычно направляют трафик к соседнему с местом обрыва волокна NE.

Чтобы окончательно прояснить характер двухволоконного кольца BLSR, укажем, что только два волокна, как следует из названия, требуются для каждого пролета кольца. Каждое волокно несет как рабочие, так и резервные каналы. Следовательно, на каждом волокне половина каналов определяется как рабочие и половина - как резервные. Рабочие каналы на одном волокне защищаются резервными каналами на другом волокне, идущими в противоположном направлении, как показано на рис. 12.3. Эта схема допускает двунаправленный рабочий трафик. При этом на каждом волокне используется только один набор каналов с заголовками.

Мы введем новый термин — NUT — *неприоритетный незащищенный трафик*. На усмотрение проектировщика системы, определенные выбранные каналы, занимающие часть рабочей емкости, и соответствующие им резервные каналы, могут быть назначены как *неприоритетные незащищенные каналы*. Оставшиеся рабочие каналы рассматриваются как защищенные соответствующими резервными каналами. Каналы NUT не имеют защиты APS в

кольце BLSR. Двухволоконные кольца BLSR поддерживают только переключение колец. Когда активируется переключение кольца, тайм-слоты, несущие рабочие каналы, переключаются на тайм-слоты, несущие резервные каналы в обратном направлении.

Четырехволоконное кольцо BLSR требует наличия четырех волокон на каждом пролете кольца. Это видно на рис. 12.4, который показывает, что рабочие и резервные каналы проходят по различным волокнам. Два волокна передают в противоположных направлениях рабочий трафик (W1, W2), а два других (P1, P2), также передающих в противоположном направлении, передают резервный трафик. Такая концепция позволяет передавать двунаправленный рабочий трафик. Заголовки, передаваемые по одному волокну, предназначены или рабочим, или резервным каналам, потому что эти каналы передаются по разным волокнам.

Если поддерживаются каналы типа NUT, то на каждом пролете выбранные каналы, занимающие часть рабочей емкости, и соответствующие им резервные каналы, назначаются как неприоритетные незащищенные каналы. Оставшиеся рабочие каналы защищаются соответствующими резервными каналами. Каналы NUT не имеют защиты APS BLSR на сконфигурированном пролете. На других пролетах тот же самый канал (если он не сконфигурирован как NUT) имеет только вариант защиты путем переключения пролета, если этот вариант для него возможен.

В обзоре, архитектура с переключением линий использует индикацию состояния (соответствующую линейному уровню модели SONET) для запуска действия защитного переключения. Действие переключения выполняется только на линейном уровне, для восстановления от отказов, оно не предполагает использования индикации маршрутного уровня. Индикация линейного уровня включает условия отказов на линейном уровне и сообщения сигнализации, которые посылаются между узлами для осуществления скоординированных действий по защитному переключению линий.

В случае кольца с коммутируемыми маршрутами, механизм запуска за-

щитного переключения формируется из информации в заголовке маршрутного уровня SONET.

12.5. Центр управления работой сети (NOCC)

NOCC — центр управления волоконно-оптической сети. Он обеспечивает оператора визуальным представлением на дисплее топологии сети, сетевых узлов, работающих и находящихся в горячем резерве цепей и цепей с одним или более отказами. Сетевые отказы упорядочены по их местоположению, а отказавшее оборудование упорядочено по номенклатуре (возможно с указанием серийных номеров) и отдельным частям этого оборудования (вплоть до карт), где такой отказ произошел. Большая часть этой информации о статусе возвращается снова в центр управления через заголовок SONET. В этом описании предполагается, что системный транспорт осуществляется либо на основе технологии SONET, либо SDH.

12.5.1. Доставка информации о статусе и показателях ошибок в NOCC

Системы SONET или SDH, как и другие подобные системы, состоят из сетевых элементов (NE). Сетевой элемент может состоять из узла передатчика, сборок из диодных элементов и т.д. Каждый элемент имеет структуру тестирования BITE, которая сообщает информацию о показателях системы. Это значит, что все, что нам нужно — собрать эту информацию и передать ее в центр NOCC для отображения на дисплеях. Указанная информация обычно передается по каналам данных служебной связи DCC, используя язык сетевого управления TL1.

12.5.2. Язык TL1

Протокол языка TL1 был разработан для передачи данных сетевых

показателей, информации об отказах и статуса сетевых элементов. TL1 служит интерфейсом между NE и командными элементами сетевого управления, обычно используемыми центром управления NOOC. TL1 формально известен как *протокол сетевого управления*. Он используется, например, с продуктом Megasys компании Telenium System — типичной системой сетевого управления и отображения, которую можно встретить на больших ВОСП. Этот протокол поддерживается стандартом Telcordia GR-831 [12.14].

12.6. Показатели ошибок и сообщения об аварийных ситуациях в SONET

С помощью байтов заголовка SONET (или SDH) ошибки оптоволоконных/ мультиплексных систем детектируются в сетевых элементах и передаются по каналам данных в центр NOOC.

Заголовок SONET/SDH достаточно емкий. Он рассматривался в разд. 9.3.2, а на рис. 9.19 была приведена структура байтов транспортного заголовка. Нам интересно, какую функцию выполняют различные байты, имеющие дело с сообщениями об ошибках, мониторингом показателей системы и активацией APS. На рис. 12.5 показаны заголовки SONET и помечены основные функции, выполняемые байтами заголовка на основе информации, содержащейся на рис. 9.19. Обсуждение, приведенное ниже, касается, в основном, байтов OA&M, которые считываются в NOOC. Поэтому в этом разделе мы осветим только следующее:

- Возможности обслуживания и сигнализации ошибок;
- Мониторинг показателей системы;
- Активация APS (см. разд. 12.5.3.1);
- Данные о линии передачи, полученные из этих заголовков.

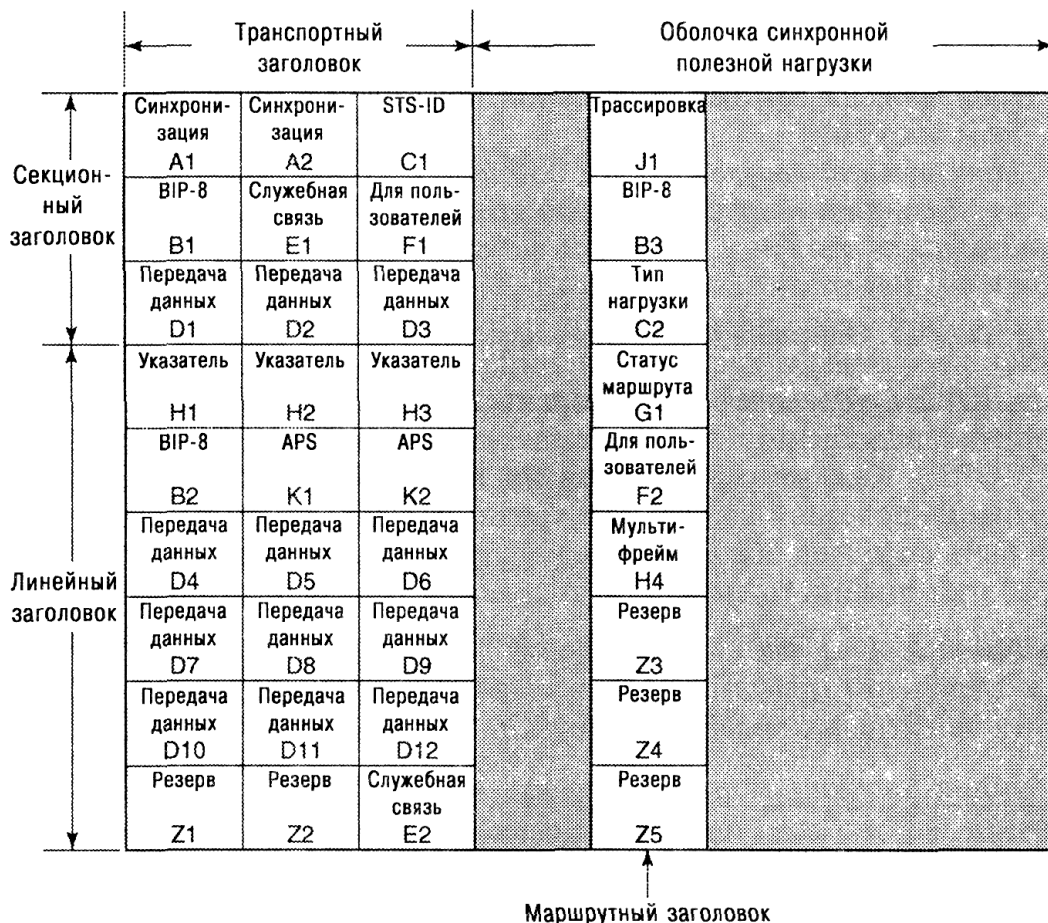


Рис. 12.5. Структура фрейма SONET, показывающая функции байтов заголовков.

12.6.1. Структура заголовков по их уровням

Как обсуждалось в гл. 9, электрические сигналы SONET и SDH состоят из сигналов трех уровней: секционного, линейного и маршрутного. Все они показаны на рис. 12.5, а точки терминирования этих заголовков показаны на рис. 12.6. Краткое описание каждого из этих уровней приведено ниже. Более полное описание приведено в разделе 12.6.1.1.

- *Секционный уровень.* Он обеспечивает фрейминг (формирование структуры фрейма) сигнала и основной уровень мониторинга показателей (качества/ошибок) при передаче нагрузки; в SDH это соответствует регенераторной секции (точнее, в SDH, также имеется секционный уровень, но он состоит из двух секций (подуровней): регенераторной секции и мультиплексной секции, см. [А-21]).

- *Линейный уровень.* Этот уровень обеспечивает функции защитного переключения и мультиплексирования информационной нагрузки; в SDH этот уровень соответствует мультиплексной секции с административным блоком (точнее, такого уровня в SDH нет, хотя мультиплексная секция в SDH, может иметь те же границы, что и линейный уровень в SONET, см. [A-21]).

- *Маршрутный подуровень.* Он обеспечивает информацию о типе полезной нагрузки и трассировку из конца в конец при управлении нагрузкой (в SDH этот уровень имеет два подуровня, см. [A-21]).

12.6.1.1. Описание уровней заголовков

Сеть SONET управляется в иерархической манере. На рис. 12.6 показано основное соглашение, используемое в спецификации SONET (напр., GR-253 CORE). Каждый сетевой элемент, который выполняет функции терминирования полезной нагрузки на уровне секции, линии или маршрута, должен быть способен обрабатывать информацию заголовка, необходимую для обработки полезного сигнала и поддержки сетевого управления.

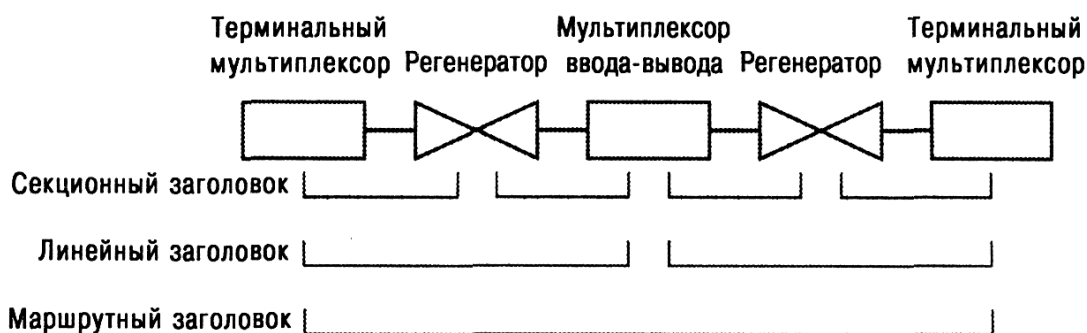


Рис. 12.6. Терминальные точки для трех типов заголовков (секционного, линейного и маршрутного)

Секционный заголовок. Этот заголовок должен обрабатываться каждым сетевым элементом, для завершения основных транспортных

функций фрейминга на сигналах полезной нагрузки. Существует также основной уровень данных мониторинга показателей системы, локального канала служебной связи, канала пользователя и 192 кбит/с канала передачи данных. Каждый сетевой элемент должен осуществить обработку заголовков на этих уровнях, а также обработку тех особенностей, которые вытекают из основных задач управления, реализованных во всех опциях SONET.

Линейный заголовок. Функции, которые обрабатываются при терминировании линии, и мультиплексные элементы в этой группе заголовка поддерживают управление полезной нагрузкой. Они включают запоминание указателя и команды автоматического защитного переключения. Дополнительные функции, реализуемые с помощью линейного заголовка, включают обработку данных мониторинга показателей системы, срочного канала служебной связи и 576-кбит/с канала передачи данных.

Маршрутный заголовок. Маршрутный заголовок (РОН) обеспечивает управление полезной нагрузкой на всей длине маршрута в местах терминирования сервиса (см. рис. 12.6) сети SONET. Этот заголовок несет данные мониторинга показателей системы, данные о типе нагрузки, обратной связи о статусе, канала пользователя и функции трассировки. Существует также маршрутный заголовок для виртуальных трибов (VT) или виртуальных контейнеров (VC). Этот заголовок также несет данные мониторинга показателей системы, о типе нагрузки и обратной связи о статусе.

12.6.2. Мониторинг показателей ошибок

Показатели ошибок — это мера показателей качества функционирования сети SONET. До реализации стандарта SONET, эта информация была ограничена, главным образом, сигналами аварийного состояния и статуса. Организации ANSI и ITU-T, главные разработчики стандартов для технологий SONET и SDH, определили функции-примитивы для мониторинга показателей, их параметры и критерии отказа для различных скоростей сигнала, используемые сетевыми элементами. Читатель

может просмотреть, например, рекомендации ITU-T G.784 [12.11] и ANSI T1.231-1997 [12.12].

12.6.2.1. Показатели и примитивы, используемые при мониторинге, и сетевые дефекты

Для обеспечения осмысленной управляющей информации, существует группа примитивов и дефектов, которые придают форму рассматриваемым параметрам и используются для измерения показателей качества сети. Эта группа включает:

- *Четность чередующихся бит (BIP)*. Код ошибки четности, генерируемый для сравнения в точке приемника и определения целостности системы.
- *Отчет о показателях ошибок на удаленном конце (FEPR)*. Это сообщение о статусе маршрута, посланное от приемника к передатчику.
- *Потеря сигнала (на уровне секции) (LOS)*. Это явление отсутствия входного сигнала в течение определенного периода времени.
- *Фрейм с серьезными ошибками (на уровне секции) (SEF)*. Сигнал формируется вслед за четырьмя последовательными сигналами с ошибками выравнивания фрейма, следующими за двумя последовательными фреймами без ошибок.
- *Потеря фрейма (на уровне секции) (LOF)*. Факт наличия дефекта в виде фрейма с серьезными ошибками в течение периода времени в 3 мс.
- *Потеря указателя (LOP)*. Отсутствие правильного указателя в 8 смежных фреймах, или случай, когда детектируется 8 смежных фреймов с установленным флагом новых данных.
- *Сигнал индикации аварийного состояния (AIS)*. Дефект, возникающий с приемом AIS-сигнала для некоторого числа фреймов, пяти - для линейного уровня и трех — для маршрутного уровня.
- *Индикация удаленного дефекта (RDI)*. Дефект, возникающий с приемом сигнала RDI для пяти фреймов, определенных на каждом уровне.

На линейном уровне фиксируется сигнал *индикации удаленного отказа* (RFI), если сигнал RDI сохраняется на маршрутном уровне, ранее регистрировался как желтый сигнал на маршруте.

Существует ряд примитивов по выбору, также, как и дефектов, специфичных для конкретного производителя. Среди этих сигналов по выбору, сигнализирующих о дефектах или показателях качества, могут быть такие, как ток смещения лазера, передаваемая и принимаемая оптическая мощность и события, связанные с защитным переключением.

12.6.2.2. Показатели ошибок

Обработывая примитивы и дефекты, можно получить определенные показатели системы. Эти показатели основаны на подсчете числа различных событий ухудшения, накопленных сетью за 15 минутные интервалы. Эти показатели обычно применяют при измерениях QoS (*качества сервиса*) в системах передачи. Показатели, используемые здесь, кратко описаны ниже:

- *Нарушения кодовой последовательности для секции (CV-S), линии (CV-L), маршрута полезной нагрузки (CV-P), маршрута VT/VC (CV-V)*. Эти нарушения рассматриваются как VIP-ошибки, детектируемые во входящих сигналах на указанном уровне.

- *Секунда с ошибками для секции (ES-S), линии (ES-L), маршрута полезной нагрузки (ES-P), маршрута VT/VC (ES-V)*. Интервал, длиной в 1 с, в течение которого происходит по крайней мере одно нарушение кодовой последовательности на указанном уровне.

- *Секунда с серьезными ошибками для секции (SES-S), линии (SES-L), маршрута полезной нагрузки (SES-P), маршрута VT/VC (SES-V)*. Интервал, длиной в 1 с, в течение которого происходит различное (устанавливаемое для каждого уровня отдельно) число нарушений кодовой последовательности на указанном уровне.

- *Секунды с серьезными ошибками фрейминга для секции (SEFS-S)* — число односекундных интервалов, содержащих одно или более SEF-событий.

- *Недоступные секунды для линии (UAS-L), удаленного конца линии (UAS-LFE), маршрута полезной нагрузки (UAS-P), удаленного конца маршрута полезной нагрузки (UAS-PFE), маршрута VT/VC(UAS-V), удаленного конца маршрута VT/VC (UAS-V).* Число секундных интервалов, для которых указанный уровень недоступен.

- *Секунды с индикацией аварийного состояния для линии (AISS-L).* Число секундных интервалов, содержащих одно или более AIS-событие, зафиксированное для линейного уровня.

- *Секунды с индикацией аварийного состояния или потери указателя для маршрута полезной нагрузки (ALS-P), маршрута VT/VC (ALS-V).* Число секундных интервалов, содержащих одно или более AIS- или LOP-событие, зафиксированное для указанного уровня.

12.6.3. Сигналы, используемые для обслуживания системы

Стандартные сигналы, используемые для обслуживания, требуют, чтобы элементы, терминирующие сигнал, принимали решения основываясь на состоянии принятой полезной нагрузки, а также на специфических действиях (осуществленных сетевыми элементами), которые сообщаются системе управления/NOOC, как информация о статусе. Эта информация, будучи доступной, состоит из следующего набора:

- *Индикация удаленного отказа (RFI).* Она показывает получение сигнала AIS сетевыми элементами того же (по рангу) уровня, расположенными ближе к источнику.

- *Индикация удаленного дефекта (RDI).* Такое сообщение об индикации дефекта возвращается к передающему сетевому элементу при приеме сигнала AIS или дефекта LOP.

- *Индикация аварийного состояния (AIS).* Это один из наиболее важных индикаторов, фиксирующий состояние потери сигнала на сетевых элементах, расположенных ближе к источнику.

- *Индикация неоснащенности (нагрузки).* Обеспечивает посылку

сообщения о частично загруженных сетевых элементах.

Использование этих сигналов обслуживания показано на рис. 12.7.

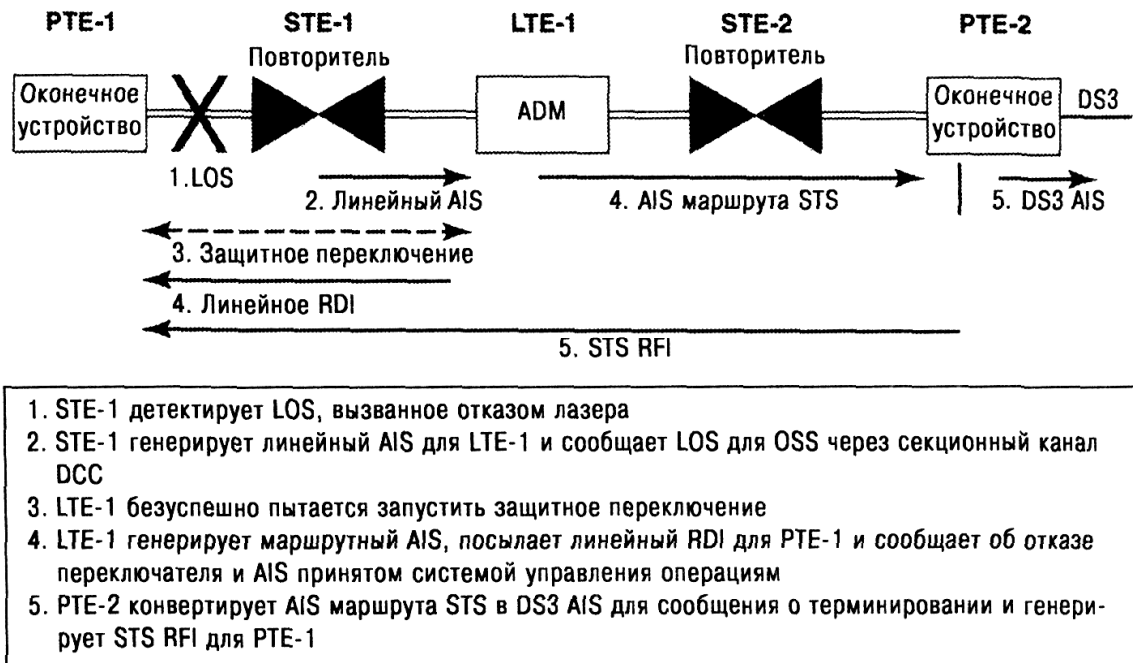


Рис. 12.7. Иллюстративные примеры сигналов обслуживания SONET/SDH.

Использованы следующие сокращения: PTE, STE, LTE - оконечное оборудование маршрута, секции и линии соответственно.

Источник: [12.13], рис. 3, с. 262.

12.6.4. Каналы инженерной связи

Каналы инженерной связи в системах SONET/SDH используются для голосовой связи. Эти каналы организуются за счет использования байтов E1 в секционном заголовке и байта E2 в линейном заголовке, см. рис. 12.5. Каналы инженерной связи в секционном заголовке используются для голосовой связи между сетевыми элементами, которые идентифицируют эти каналы как локальные. Каналы инженерной связи, организованные в линейном заголовке не терминируются секционным оконечным оборудованием (например, оборудованием STE или регенераторов). В этом случае эти каналы обозначаются как каналы срочной служебной связи.

12.6.5. Каналы пользователей

К этим каналам относятся каналы 64 кбит/с, организуемые с помощью байтов секционного и маршрутного заголовков. Они обеспечивают терминирование на каждом сетевом элементе, а также на оборудовании маршрутных окончаний. В секционном заголовке для этого предназначен байт F1, он является каналом пользователя. В маршрутном заголовке — это байт F2. Эти каналы используются по усмотрению производителя оборудования. Они могут быть использованы для транзита или ретрансляции дополнительной информации об аварийном состоянии или как дополнительные голосовые каналы.

12.6.6. Каналы передачи данных (DCC)

Два канала данных определены стандартом ANSI для работы в системах SONET, они формируются байтами D1, D2 и D3 в секционном заголовке, обеспечивая единый канал емкостью 192 кбит/с. В линейном заголовке существуют шесть 64 кбит/с каналов, зарезервированных для передачи данных. В объединенном варианте они составляют канал емкостью 576 кбит/с. Типичный 576 кбит/с канал использует стек протоколов, основанный на 7 уровневой эталонной модели OSI. Этот канал обслуживает транспортировку сигналов аварийного состояния, статуса, управления и информации о показателях качества системы другим элементам сети. Этот высокоскоростной канал терминируется только на линейных оконечных устройствах (LTE).

12.7. Минимизация необходимых запасных узлов

Из выражения (12.1) видно, что доступность можно улучшить путем увеличения показателя MTBF или путем уменьшения показателя MTTR. Надежность устройств можно улучшить либо путем использования

высоконадежных устройств, либо за счет избыточности, либо и тем и другим способом. В любом случае это будет стоить денег.

Второй фактор (избыточность) может быть одинаково важен, или, в некоторых случаях, даже более важен. Если какой-то узел отказывает и его нет на складе, то время MTTR может вырасти до нескольких недель, создается крайне нежелательная ситуация. Из этого следует, что было бы лучше хранить на складе все необходимые запчасти, блоки и готовые узлы, а также сменные карты. Это может стать главной статьей расходов, которые, как известно, неэффективны. Например, операционные карты могут лежать на складе годами, и их использование будет нулевым. Они, может так случиться, не будут использованы в течение всего срока службы системы.

Руководящие указания в этом случае можно найти в разделе 7 стандарта Telcordia SR-TSY-000385, Reliability Manual (Руководство по надежности) [12.15]. Их основной принцип основан на *показателе непрерывности сервиса (SCO)*, используя который мы потребовали бы доступности для основной линии ВОСП большой дальности, по крайней мере, 99,99%, для Telcordia SCO эта величина составляет 99,9%. Она приводится обычно для большого количества используемого оборудования (например, 160000 регенераторов); наши числа значительно меньше.

Математически, Руководство по надежности использует произведение NRT , где N — число блоков, находящихся в обслуживании; R — скорость замены в блоках в час; T - среднее время выполнения операции в часах.

Наша концепция (применительно к запасным частям) состоит в том, чтобы требовать минимизации числа *различных* запасных частей. Например, для ВОСП большой дальности все узлы передатчиков должны быть одинаковы и взаимозаменяемы, использующими те же самые лазерные диоды. Все узлы приемников должны быть теми же самыми и т.д. Мы можем использовать для запасных частей нормы, приведенные в разделе 7 стандарта Telcordia (Руководство по надежности), например, для передатчиков, используя значение SCO.

Для оптоволоконных систем, покрывающих большие географические пространства, центры обслуживания должны располагаться там, где проживает обслуживающий персонал. Идея здесь в том, что это позволяет уменьшить время на разъезды персонала к месту аварии. Каждый такой центр должен иметь небольшой склад запчастей. Мы должны иметь представление о частоте выхода из строя для каждого узла или карты. Опираясь на эти данные, мы рассчитываем число узлов/карт, которое должно храниться в запасе на складе центра обслуживания. Ожидается, что эти центры обслуживания соединены между собой телефонными линиями и локальными сетями (типа Ethernet). Центры обслуживания должны находиться поблизости от основных узлов ВОСП, таких как ADM, соединенных с центром коммутации соответствующего ранга. Для удаленных устройств, время персонала в пути к месту аварии должно быть включено в MTTR. Акцентируя еще раз на значении показателя MTTR, заметим, что требуется:

- два часа для замены устройств в месте, где находится ремонтники, время в пути здесь мало по сравнению с MTTR;
- четыре часа для замены устройств, находящихся в относительной близости к этому месту;
- шесть часов — для замены удаленных устройств.

Когда ремонтник покидает центр обслуживания, он должен знать, какой отказавший узел или карту ему необходимо взять с собой. Место, где произошла авария, и какой узел/карта вышли из строя, должны быть определены по информации, которая обеспечивается системой управления NOOC. Она играет жизненно важную роль в уменьшении показателей MTTR.

ГЛАВА 13 ВАРИАНТЫ СЕТЕВОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ СИСТЕМЫ

13.1. Бесперебойное питание

Система связи, которая теряет источник первичного питания прекращает свою работу. Многие системы связи жизненно необходимы для систем здравоохранения и социального обеспечения, руководства штата и федерального правительства, для человечества в целом. Сети связи общего пользования (PSTN) находятся на самом вершине приведенного списка, наряду с системами безопасности и сетями вооруженных сил. Фактически первыми, кто использовал бесперебойное питание были PSTN. Были ли вы в центрах коммутации PSTN, называемых местными офисами, в США? В них вы можете увидеть огромные банки батарей, обычно свинцово-кислотные, которые выглядят, как большие ящики. Они мало изменились за последние десятилетия. Их дизайн практически не модернизировался, хотя сам продукт конечно стал более эффективным. Их концепция была распространена на другие приложения, где определенное устройство или группа устройств требуют «жизнеспасающего» питания. В некоторых приложениях, таких как сети связи, работоспособность систем (по питанию) должна быть 100%.

В этом разделе мы опишем системы бесперебойного питания, которые могут найти применение в активных узлах и терминалах ВОСП. Многие из этих систем используют постоянный ток и напряжение, которые обычно используются в этой области техники: -48 В (DC) или $+24\text{ В (DC)}$. Если требуется переменное напряжение, можно использовать инвертор, преобразующий постоянный ток (DC) в переменный ток (AC).

Цель при этом, сформировать резервную систему питания с приемлемыми параметрами. Время работы резервного источника - это единственный параметр, который определяет цену. Мы определим *резервное*

время, как такое время, при котором батарея сможет обеспечить полную нагрузку без изменения напряжения. Часто определение резервного времени является прерогативой системного проектировщика.

Как правило, статическая система бесперебойного питания состоит из зарядного устройства, батареи или набора батарей и нагрузки. Последовательно (между батареей и нагрузкой) может быть включен элемент, вырабатывающий противоэдс. Простая функциональная схема такой системы показана на рис. 13.1.

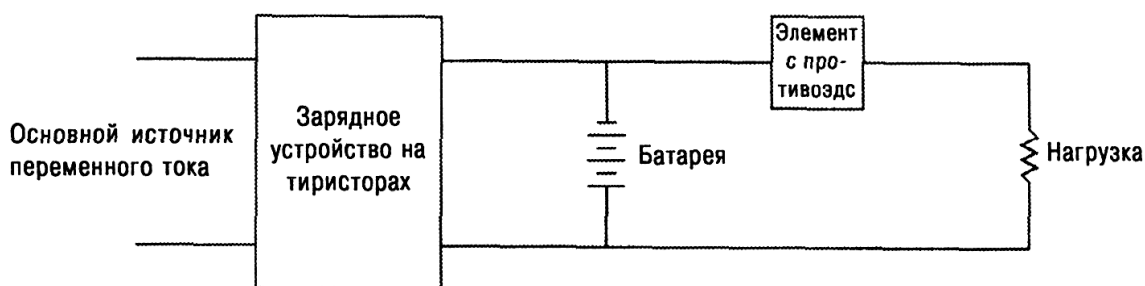


Рис. 13.1. Упрощенная блок-схема статической системы бесперебойного питания.

Основываясь на своем опыте, могу дать некоторые общие рекомендации. Когда основная система электропитания установлена, она должна иметь две шины. Одна несет *критическую нагрузку*, а другая — регулярную нагрузку. Критическая нагрузка должна включать линейное оборудование, аварийное освещение, и другие критичные для функционирования системы элементы. Телекоммуникационное оборудование обычно питается от источника постоянного тока напряжением —48 В. Только критическая нагрузка поддерживается системой бесперебойного питания. Это обеспечивает значительную экономию средств как на заводской цене, так и периодических издержках. Это позволяет проектировщику больше свободы в выборе резервного времени.

Ожидается также, что система бесперебойного питания будет поддержана мотор-генератором или даже сдвоенным блоком мотор-генераторов. Проект должен быть выполнен так, чтобы мотор-генератор мог

быть запущен и выведен на требуемые параметры выходного напряжения не более, чем за 5 минут. Рекомендуется, в этом случае, иметь значение резервного времени 1 час или больше [13.1, 13.2].

13.2. Кинетические системы с маховиком

Кинетические системы с маховиком снова входят в моду. Их принципиальный недостаток в том, что если в маховике есть дефект, то система может разлететься на части со всеми вытекающими из этого последствиями. Одним из ярких моментов этой картины будет то, что прекратятся все разговоры о недостатках батарейных систем. Однако батарейные системы имеют ограниченный срок жизни, тогда как срок службы кинетических систем составляет 50 лет. Батареи также могут быть опасны тем, что может происходить их взрыв за счет аккумулированных газов.

Кинетическую систему можно описать как генератор, расположенный на одном валу с мотором, приводимым в движение газовым или дизельным двигателем. При этом между генератором и мотором располагается большое маховое колесо. Между маховиком и мотором располагается электрически управляемая муфта сцепления. При нормальной эксплуатации, когда работает коммерческий источник основного питания, его ток течет через обмотку муфты, оставляя ее не сцепленной. Как только первичный источник напряжения потерян, ток прекращает течь по обмотке муфты и она разъединяясь с одной стороны, соединяет основной вал с валом мотора. Инерция маховика заставляет приводной вал продолжать вращение, приводя мотор вновь в рабочее положение, а также заставляя вращаться генератор, подающий напряжение на линию. Концепция, положенная в основу этих систем — кинетическая энергия, запасенная быстровращающимся маховиком. Из физики известно, что кинетическая энергии вращающегося

устройства, такого, как маховик, является функцией веса маховика и скорости его вращения.

Резервное время, эквивалентное системе с маховиком, называется *прогоном* (ride-through). Одна промышленная кинетическая система бесперебойного питания [13.3] имеет (согласно спецификации) прогон равный 15 с. Это устройство используется для хранения кинетической энергии и старта мотор-генератора и называется «Индукционный мотор-генератор сцепленный с маховиком.» Конечно, во время прогона ожидается, что мотор-генератор стабилизируется и начинает отдавать постоянное напряжение в нагрузку. На рис. 13.2 приведена блок-схема *динамической системы сохранения энергии (DESS)*.

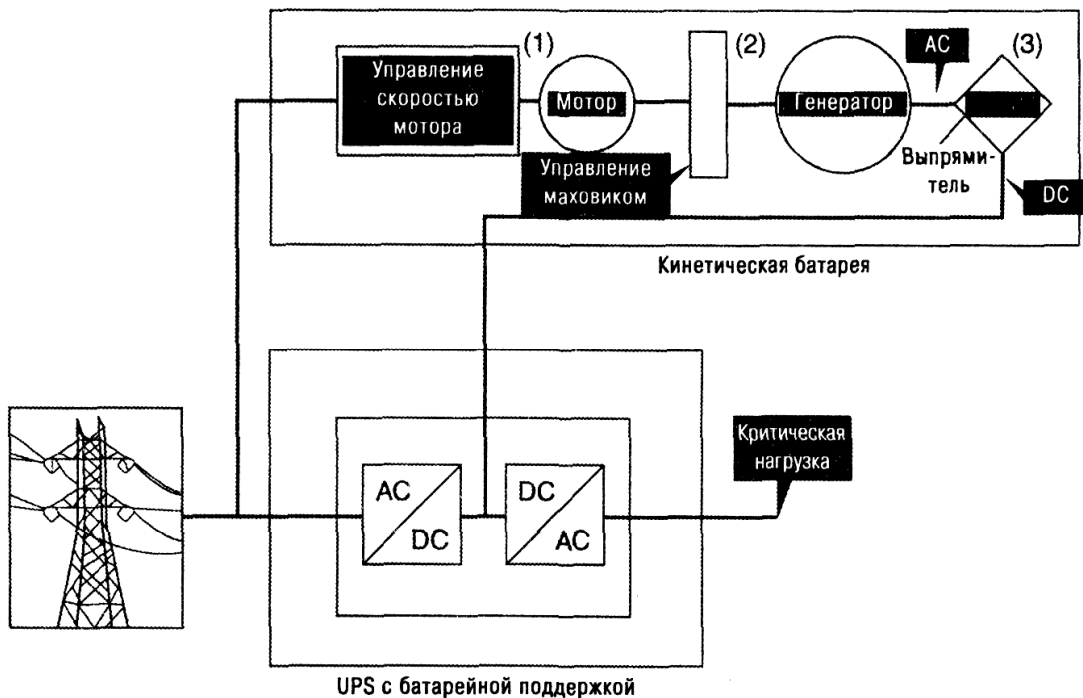


Рис. 13.2. Блок-схема, иллюстрирующая работу динамической системы хранения энергии (перепечатано с разрешения компании International Computer Power [13.3])

На этом рисунке схема управления мотором (1), сообщая ему максимально возможную скорость для увеличения кинетической энергии маховика (2) и позволяя полностью использовать возможности генератора. Выходное

напряжение генератора с маховиком затем выпрямляется (3) в регулируемое напряжение постоянного тока, позволяя маховику уменьшать скорость до 50% от его номинальной скорости вращения и все еще обеспечивать мощность, эквивалентную батарее для инвертора системы бесперебойного питания.

13.3. Обычные статические системы бесперебойного питания

На рис. 13.3 приведена упрощенная блок-схема статической системы бесперебойного питания. Она состоит из выпрямителя и батарейного блока, который питает нагрузку. Выпрямитель питается от основного источника переменного тока. Обычно существует переключатель, который соединен с резервным АС-генератором, приводимым в действие дизельным или бензиновым двигателем. Когда основной источник АС-напряжения потерян, автоматически заводится мотор-генератор. Как только генератор запустился он (вместо батарей) начинает питать систему, до тех пор пока промышленный источник не вернется к своему нормальному варианту функционирования. В системе нет переходных процессов коммутации, так как нагрузка всегда питается от батареи, вне зависимости от того, потребляет ли она постоянное или переменное напряжение. Если нагрузка требует 110 или 220 В переменного тока, она питается от инвертора DC-AC. Вход постоянного тока для инвертора обеспечивается от батареи. Переключатель, соединяющий выход мотор-генератора со входом переменного тока зарядного устройства батареи, может быть активирован автоматически или вручную.

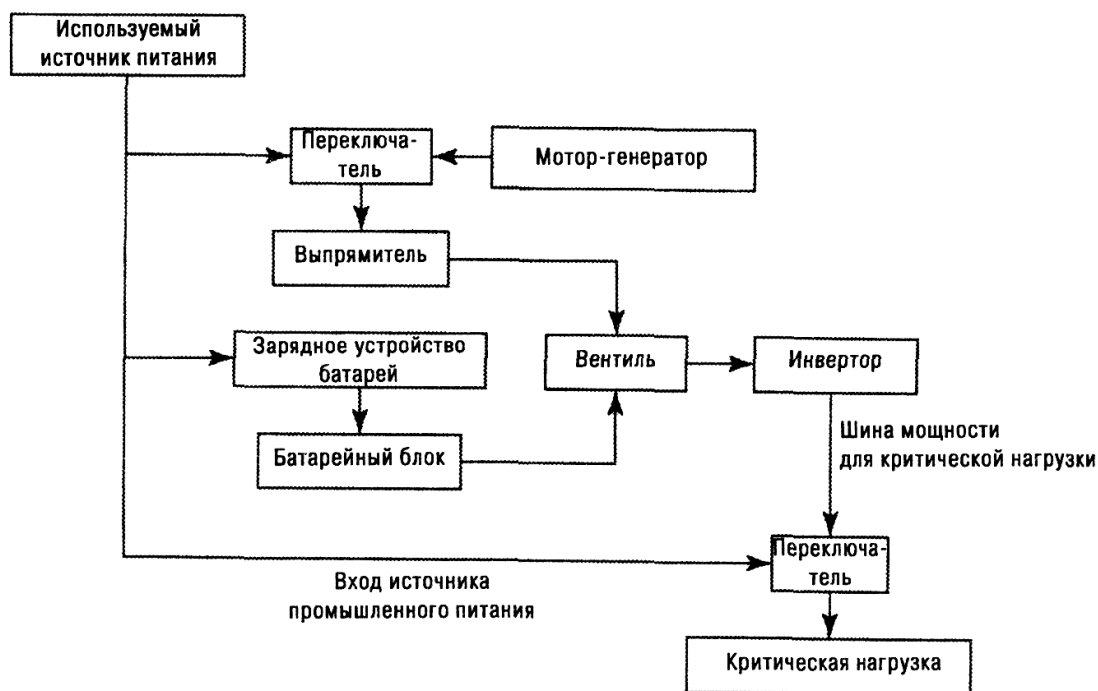


Рис. 13.3. Функциональная блок-схема законченной статической системы бесперебойного питания. Заметим, что если телекоммуникационная система использует питание постоянного тока -48 В , то нет необходимости применять инвертор, показанный на схеме.

13.3.1. Классификация обычных статических систем бесперебойного питания

Зарядные устройства, как правило, основаны на использовании тиристоров (SCR). Технология высокочастотного прерывания, использующая тиристоры, была внедрена несколько лет тому назад на конверторах AC-DC и DC-AC. Теперь та же самая технология используется для зарядных устройств батарей. Результатом этого стало значительно снижение требуемой емкости фильтров в системе выпрямителя и меньшие пульсации. Последние следует специфицировать на уровне $0,10\%$ и ниже. Для того, чтобы обеспечить низкий уровень фона переменного тока, 50 мВ и ниже, нужно задать ограничения на максимальное значение уровня пульсаций.

Шум от блока батарей не должен превышать -70 дБмп (псофометрические

дБм). Как измерение пульсаций, так и шума, должны проводиться в условиях полной нагрузки, при подключенном источнике промышленного переменного тока.

Современные свинцово-кислотные батареи остаются очень привлекательными для систем телекоммуникаций, так как имеют срок службы 15 лет. Однако продолжают использоваться и старые элементы типа свинец-сурьма. Элементы на основе кальций-свинец стоят на 10-15% больше, чем обыкновенные свинцово-кислотные батареи, еще более дорогими являются никель-кадмиевые элементы (NiCad).

Зарядные цепи должны выдерживать изменения номинального входного переменного напряжения, по крайней мере, на $\pm 10\%$. Зарядное устройство также должно обеспечить требуемое выходное постоянное напряжение при достаточно широких допусках на изменение нагрузки.

Для некоторых приложений нагрузка по постоянному току может меняться в огромных пределах. Например, местный коммутатор (местный офис), используемый в бизнес-приложениях, емкостью 10000 линий, может потреблять в часы наибольшей нагрузки до 800 А при напряжении 48 В. В два часа утра этот же коммутатор может потреблять 15% от этого уровня, т.е. 120 А. Волоконно-оптические регенераторы потребляют только 5 А в течение всего дня.

Полагаем, что зарядные устройства используют тиристоры, или другие типы SCR, благодаря их легкому весу, простоте и хорошим рабочим характеристикам. Распределение нагрузки также должно быть включено в спецификацию зарядного устройства. Оно позволяет использовать два или больше зарядных устройства, не обязательно одинаковой емкости, для того чтобы обеспечить выход на общую шину и питать нагрузку, соединенную с этой шиной, в соответствии с ее номинальной емкостью. Это делается путем соединения сигналов управления постоянным током и юстировки потенциометров распределения нагрузки.

Чтобы подобрать батарею и зарядное устройство, можно использовать

следующее выражение (13.1), где емкость батареи (C_{ah}) в ампер-часах (А-ч) определяется так:

$$C_{ah} = I_L \times T_R \quad (13.1)$$

где I_L — ток нагрузки в А, а T_R - резервное время в часах.

Резервное время — это время, в течение которого система может работать при питании только от батарей, когда основное питание переменного тока отключено по каким-то причинам. При проектировании резервное время обычно выбирается из следующего ряда: 8, 12, 24, 48 и 72 часа. Если оно увеличивается, то растет и стоимость установки UPS. Резервное время зависит от того, сколько времени, предположительно, будет длиться перерыв в основном питании, или от того, сколько времени потребуется, чтобы доставить, запустить и подключить к линии резервный мотор-генератор. Это время должно включать время приезда техников на место. Однако при некоторых обстоятельствах, резервный генератор может быть подключен автоматически, и нет нужды вызывать техников, по крайней мере по этой причине.

В ряде случаев, когда подрядчик «срезает углы», он полагает, что в проекте было заложено резервное время 8 часов, считая, что оно достаточно для того, чтобы линии снабжения основного питания были восстановлены. Нам кажется, что такая практика опасна. Хотя вероятность того, что 8 часов будет достаточно, велика, но его может оказаться недостаточно. Мы считаем, что резервный генератор необходимо иметь, он будет поддерживать снабжение питанием до тех пор, пока хватит топлива. Некоторые устройства не только имеют запасной топливный бак, но и второй генератор, в случае, если первый генератор откажет. Практика говорит нам, что если некий генератор откажет в будущем, то он с большой вероятностью откажет при первом старте. Вот почему хорошо периодически запускать резервные генераторы несколько раз в году на холостую нагрузку [13.4].

Соотношение для определения нагрузки на зарядное устройство (I_{ch}) имеет вид:

$$I_{ch} = I_{ba} + I_L \quad (13.2)$$

где I_{ba} - ток батареи. Эти токи показаны на рис. 13.4. Другой параметр, который должен быть рассмотрен, — время перезарядки T_{ch} , выраженное в часах. Средний ток, требуемый для перезарядки батареи можно выразить следующим образом:

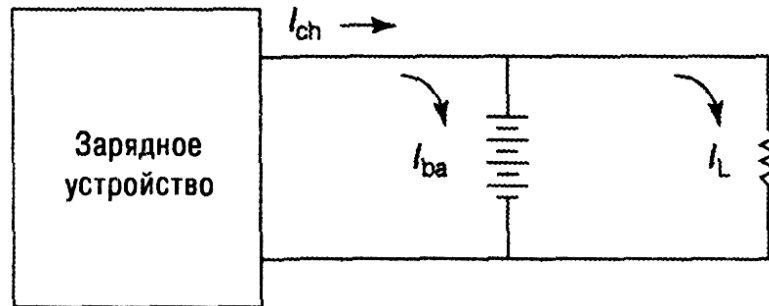


Рис. 13.4. Упрощенная схема, показывающая зарядное устройство, токи, батарею и нагрузку.

$$I_{ba} = \frac{C_{ah}}{T_{ch}}$$

Комбинируя последние два уравнения, получаем:

$$I_{ch} = \frac{C_{ah}}{T_{ch}} + I_L$$

Объединяя далее полученное выражение с выражением (13.1), получим

$$I_{ch} = \frac{I_L \times T_r}{T_{ch}} + I_L$$

Энергия, требуемая для перезарядки батарей представлена членом $(I_L \times T_r)/T_{ch}$, при условии, что батарея имеет 100% эффективности. Однако часть энергии необходима для компенсации химических и тепловых потерь; обычно на это требуется 10%. Следовательно,

$$I_{ch} = I_L + 1,1 \left(\frac{I_L \times T_r}{T_{ch}} \right)$$

или

$$I_{ch} = I_L + \frac{1,1 T_r}{T_{ch}}$$

Используя это выражение, можно определить ток I_{ch} . Ток I_L ,

называемый иногда *бюджетом мощности*, обычно задается. Резервное время и время перезарядки являются проектными параметрами и должны быть определены.

Стандартные, с номинальным напряжением в 2 В, свинцово-кислотные элементы считаются полностью разряженными, когда напряжение элемента падает до 1,75 В при температуре 25°C. Это напряжение называется *конечным напряжением* и используется в качестве стандартного в промышленности. Однако некоторые системные проектировщики используют и более консервативное значение конечного напряжения в 1,84 В. Конечное напряжение считается действующим при 8-часовой скорости разряда (резервное время — 8 часов).

Для того, чтобы иметь возможность сопоставить емкость при резервном времени в 8 часов с другими подобными емкостями, приведена табл. 13.1. Она демонстрирует новый аспект в определении требуемой емкости батареи.

Таблица 13.1

Таблица преобразования емкости для выбранного резервного времени к другим емкостям.

| Рейтинг (час) | Емкость на положительную пластину (А-час), при конечном напряжении 1,75В | Емкость (%) |
|---------------|--|-------------|
| 24 | 75 | 125 |
| 12 | 66 | НО |
| 8 | 60 | 100 |
| 6 | 55 | 91 |
| 4 | 50 | 83 |
| 2 | 40 | 66 |

Источник. [13.2], табл. 34-1, с. 3091.

Размеры батареи (т.е. требуемая емкость в А-час) определяется в терминах одной положительной пластины. Общий рейтинг элемента определяется путем умножения рейтинга одной пластины на число пластин в элементе. Следует иметь в виду, что всегда существует на одну

отрицательную пластину больше числа положительных пластин в элементе.

При спецификации установки батарей/зарядных устройств используются термины, приведенные в табл. 13.2. Эта таблица показывает термины с примерами значений, полученных для 48 В (DC) установки. Термины приведены в порядке убывания эквивалентного напряжения.

Таблица 13.2

Термины, используемые при спецификации установок батарей/ зарядных устройств.

| Термин | Напряжение на 1 элемент | Напряжение на 24 элементах |
|---|-------------------------|----------------------------|
| Выравнивающий ^{а)} | 2,30 | 55,20 |
| Плавающий ^{б)} | 2,17 | 52,08 |
| АС нет (нагрузка не подключена) ^{в)} | 2,05 | 49,20 |
| АС нет, начальная полная нагрузка ^{г)} | 1,97 | 47,28 |
| АС нет, средняя полная нагрузка ^{д)} | 1,92 | 46,08 |
| АС нет, конечная полная нагрузка ^{е)} | 1,75 | 42,00 |

^{а)} Выравнивающее напряжение значительно выше, чем 2,05 В (DC) на 1 элемент и применяется относительно короткий период времени.

^{б)} Плавающие условия допускают медленный заряд, используя напряжение достаточно высокое для преодоления внутреннего сопротивления элемента. Следовательно, зарядное напряжение должно быть на десятые доли выше, чем 2,05 В (DC) на элемент.

^{в)} Полностью заряженная свинцово-кислотная батарея без нагрузки имеет разность потенциалов между отрицательной и положительной пластинами элемента 2,05 В. Относительная плотность электролита батареи будет 1,215. Некоторые батареи в таких устройствах используют высокоплотные электролиты, для которых плотность в полностью заряженном состоянии составляет 1,300.

^{г)} Напряжение при начальной полной нагрузке равно 2,05 В (DC) - $I_L \times R_{int}$, где R_{int} — внутреннее сопротивление элемента в Ом.

^{д)} Напряжение при средней рабочей нагрузке, которое может ожидать тогда, когда элемент «на полпути» между полным зарядом и конечным напряжением. При этом предполагается постоянная скорость разряда.

^{е)} Конечное напряжение - стандартный параметр.

Источник. [13.2], табл. 34-2, с. 3091.

При выборе размеров батареи и зарядного устройства проектировщик должен быть уверен, что представленная нагрузка сможет выдержать обычные изменения входного напряжения (DC) $\pm 10\%$. Эти значения должны быть проверены по спецификации на оборудование, которое является рассматриваемой нагрузкой.

Предположим, что имеем блок питания 48 В (DC). Тогда наибольшее напряжение будет 52,8 В, а наименьшее - 43,2 В. Если заряд выравнивания был 55,2 В (DC), см. табл. 13.2, тогда на выравнивание зарядное устройство использовало бы регулирующий элемент Semf с противо-ЭДС, показанный на рис. 13.1. Падение напряжения на этом элементе должно быть равно 2,4 В ($55,2 - 52,8 = 2,4$). В конструкции такого элемента должно быть предусмотрено его отключение при отказе основного питания переменного тока, так чтобы нагрузка получила полное напряжение батареи. Этот элемент также должен выдерживать полную токовую нагрузку.

Эту концепцию иллюстрирует следующий пример:

Пример.

Регенератор радиолинии, 48 В (DC)

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| 8 групп приемопередатчиков | 20 А |
| 2 блока служебной связи | 1 |
| 1 блок сигналов аварийного состояния | 1 |
| Мачтовые огни, проблесковые огни | 10 |
| Внутреннее освещение | 3,5 |
| Нагрев и вентиляция | 14,5 |
| Итого: | 50 А |

Пункт не посещаемый и достаточно изолированный. Резервное время равно 12 часам.

$$I_L = 50 \text{ А}, \quad T_R = 12 \text{ ч.}, \quad T_{ch} = 48 \text{ ч.},$$

$$I_C = 50 (1 + 1,10 \times 12/48) = 63,75 \text{ А (рейтинг зарядного устройства)}$$

Батарея: 48 В (DC) или 24 элемента.

Конечное напряжение элемента: 1,75 В (DC).

Из рис. 13.5 (ниже) получаем (как проекцию точки пересечения прямой с параметром 12 ч и кривой с параметром 1,75 FV) ток 5,5 А на каждую положительную пластину.

Число положительных пластин: $50/5,5 = 9,9$, округляемое до 10.

Число отрицательных пластин: $10 + 1 = 11$.

Общее число пластин на элемент: 21.

На рис. 13.5 приведены семейства кривых, используемых для определения количества ампер, приходящихся на одну положительную пластину типичной батареи. Эта информация важна при определении размера новой батареи при установке UPS.

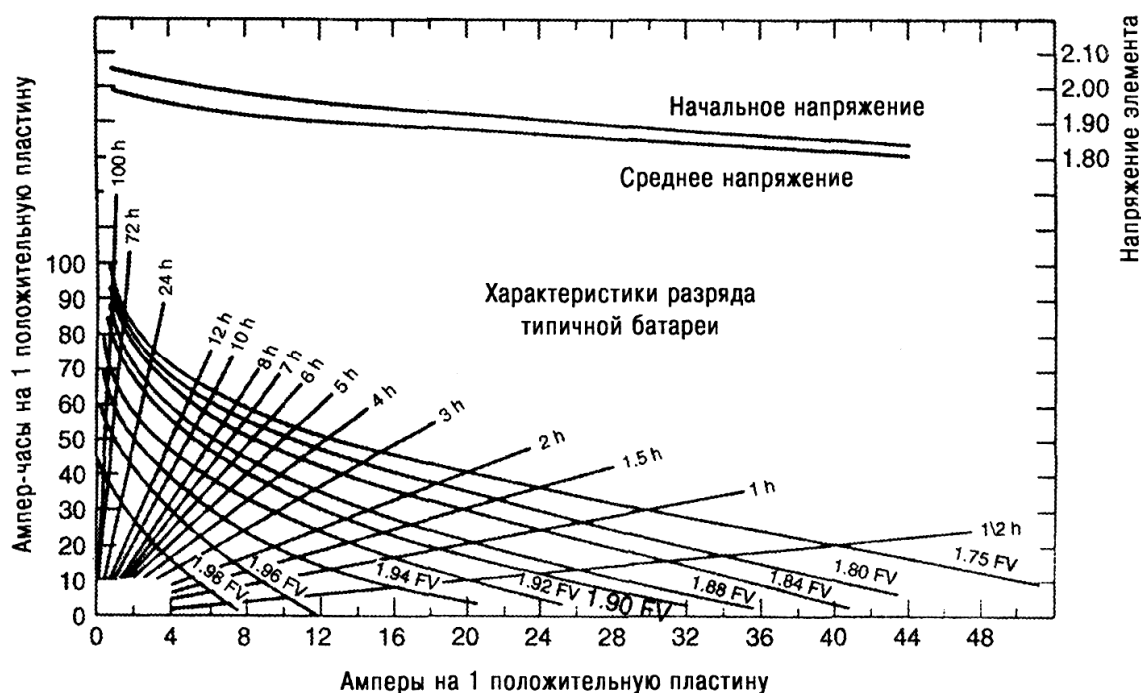


Рис. 13.5. Кривые для определения количества ампер на положительную пластину. Здесь FV - конечное значение напряжения элемента в вольтах, (h — ч) (С разрешения компании Warren G-V Communications, [13.2], рис. 34-3, с. 3093.)

13.3.2. Указания по использованию вторичных элементов

Вторичные элементы, соединенные вместе, составляют батарею. Она

называется *стационарной батареей*. Существует два типа стационарных батарей, широко используемых в индустрии телекоммуникаций: одна — свинцово-кислотная электрохимическая пара, вторая — никель-кадмиевая электрохимическая пара.

Можно сказать, что свинцово-кислотные батареи менее дорогие (по начальным затратам), чем никель-кадмиевые. Однако начальные капитальные затраты могут быть только одной из составляющих затрат во многих применениях, так как никель-кадмиевые батареи имеют больший срок службы, большую жесткость конструкции и меньше затрат на обслуживание. Меньшая стоимость может быть перекрыта требованиями приобретения дополнительных батарей для получения необходимого напряжения.

Существуют три типа конструкций, используемых для стационарных свинцово-кислотных батарей с положительными пластинами: Форе (Faure), Планта (Plante) и многополостная (multitubular). Отрицательные пластины рассматриваемой батареи относительно мало изменились и фактически все производители используют стандартизованную конструкцию Форе для отрицательных пластин.

Пластины Форе (или пастированные пластины) имеют два варианта: свинцово-сурьмянистые и свинцово-кальциевые. В любом из вариантов сплав свинца с сурьмой или кальцием наносится в виде пасты (пастируется) на плоскую свинцовую сетку. Преимущество свинцово-сурьмянистого варианта в возможности поддерживать длинный и частый разряд с минимальными структурными изменениями. Его недостатком является требование более частой доливки воды при старении элементов. Версия свинец-кальций требует небольшой добавки воды в процессе эксплуатации, однако частый разряд батарей может вызвать структурный рост, способствующий сокращению срока службы батарей.

Стационарные никель-кадмиевые батареи обычно конструируются с пластинами в миниатюрном (карманном) варианте. Другая конструкция использует спеченные пластины, она нежелательна тем, что имеет *эффект*

«памяти», описанный ниже.

Свинцово-кислотная электрохимическая пара имеет номинальное напряжение 2 В, тогда как никель-кадмиевая - номинальное напряжение 1,2 В. Поэтому при формировании батареи на нужное напряжение потребуется больше никель-кадмиевых элементов, чем свинцово-кислотных.

Число элементов батареи для конкретной системы является фактором адаптации, позволяющим удовлетворить требуемому уровню напряжения заряда и напряжению в конце разрядного периода (окно напряжений). Наиболее часто встречающиеся в эксплуатации системы и число используемых в них элементов приведены в табл. 13.3.

Таблица 13.3

Число элементов для получения требуемого напряжения.

| | | | | | |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-----------|
| Номинальное напряжение батареи | 120 | 48 | 32 | 24 | 12 |
| Число свинцово-кислотных элементов | 60 | 24 | 16 | 12 | 6 |
| Число никель-кадмиевых элементов | 92 | 37 | 24 | 19 | 10 |
| Напряжение выравнивания/перезарядки | 143 | 58 | 38 | 30 | 15,5 |
| Плавающее напряжение | 129 | 51 | 34 | 26 | 13 |
| Конечное напряжение ^{а)} | 105 | 42 | 27 | 21 | 10,5 |
| Окно напряжений | 143-105 | 58-42 | 38-27 | 30-21 | 15,5-10,5 |

^{а)} Конечное напряжение - это предел, накладываемый производителем электрического оборудования, которое запитывается от источника. Однако, как следует из эмпирического правила, свинцово-кислотная батарей не должна разряжаться ниже 75% от своего номинального напряжения (1,5 В на элемент), тогда как никель-кадмиевые батареи на должны разряжаться ниже 50% своего номинального напряжения, т.е. 0,6 В. Для избежания глубокого разряда, большинство систем батарейного питания имеют реле напряжения, которое автоматически отключает систему при достижении конечного напряжения.

Замечание. Не исключен вариант изменения числа элементов для некоторых применений.

13.3.3. Перезарядка/выравнивание заряда

В свинцово-кислотных батареях, даже если батареи не разряжены, напряжение отдельных элементов начинает дрейфовать в сторону от номинала и после 60-90 дней элементы с низким напряжением требуют восстановления до состояния полной зарядки путем увеличения (на 25-30 часов) зарядного напряжения примерно на 10%. Этот процесс называется *выравниванием* батареи. Никель-кадмиевые батареи имеют меньший саморазряд, в результате, если никель-кадмиевые батареи не разряжаются за счет действия внешней нагрузки, они остаются полностью заряженными на многие годы с напряжением 1,2 В на элемент. Поэтому никель-кадмиевые элементы не нуждаются в выравнивании.

Однако, никель-кадмиевые батареи нуждаются в режиме заряда с двойной скоростью для плавающего/выравнивающего зарядного устройства батареи.

Как свинцово-кислотная, так и никель-кадмиевая батареи требуют использовать примерно на 10% более высокое напряжение, для того чтобы восстановить разряженную батарею до полностью заряженного состояния.

Резервные батареи обычно применяются при плавающем напряжении, когда эти батареи, зарядные устройства и нагрузка соединены параллельно (см. рис. 13.6). Мощность зарядного оборудования выбирается так, чтобы обеспечить ту мощность, которая требуется для относительно стабильных нагрузок (таких, как индикаторные лампы, катушки удержания реле), небольших периодически меняющихся нагрузок плюс достаточно дополнительной мощности для сохранения полного заряда батарей. Сильно меняющиеся нагрузки будут отбирать мощность у батареи, мощность батарей будет восстанавливаться зарядным устройством в моменты, когда эта меняющаяся нагрузка прекращается.

Когда переменный ток, питающий систему, отключается, батареи мгновенно воспринимают все подключенную нагрузку. Если батарея и зарядное устройство определенным образом согласованы с нагрузкой и друг с другом,

то не возникает видимых падений напряжения при возвращении системы к работе только от батарей.

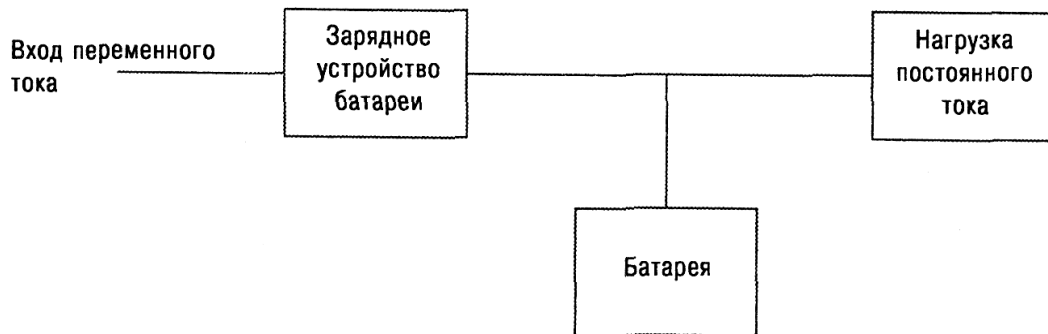


Рис. 13.6. «Плавающая» диаграмма батареи.

Когда непредвиденная нагрузка на систему заканчивается и зарядная мощность восстанавливается, зарядное устройство доставляет больше тока, чем если бы батареи были полностью заряжены. Мощность зарядного устройства должна быть выбрана так, чтобы быть уверенным, что оно сможет обслужить нагрузку и восстановить полный заряд батареи в приемлемое время. Увеличенный ток, доставляемый зарядным устройством во время восстановления батареи, будет уменьшен, как только батарея приблизится к состоянию полного заряда. Управление зарядным устройством будет поддерживать плавающее напряжение батареи на предписанном уровне, когда батарея будет полностью заряжена.

Односкоростное плавающее зарядное устройство будет адекватно поддерживать полностью заряженную никель-кадмиевую батарею до тех пор, пока она не разрядится под действием внешней нагрузки. Однако, с тех пор, как она разрядится, она не перезарядится до напряжения большего 85% от плавающего напряжения, независимо от того, какой емкостью обладает зарядное устройство. С каждой последующей перезарядкой никель-кадмиевая батарея в такой зарядной цепи может продолжать терять емкость. Это явление называют *эффектом «памяти»*. В простейшем случае это результат неадекватной перезарядки любой батареи. Это наблюдается даже в свинцово-кислотных батареях. Однако, до того, как потери емкости будут замечены,

свинцово-кислотная батарея выйдет из строя за счет сульфатизации положительных пластин, что происходит очень быстро в результате недозарядки свинцово-кислотных батарей.

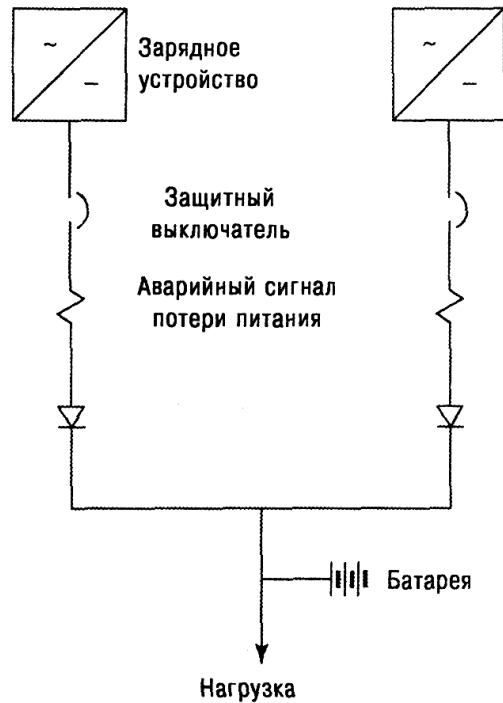


Рис. 13.7. Типичная схема резервных цепей зарядного устройства.

Зарядный выпрямитель или батарейное зарядное устройство — очень важная часть систем резервного питания и нужно обращать внимание на резервирование самих зарядных устройств в ответственных ситуациях. На рис. 13.7 показана концепция такого резервирования, которое может существенно улучшить надежность устройства в целом, увеличивая, тем самым, доступность системы. Общая формула для выбора емкости (размера) такого батарейного зарядного устройства (БЗУ) для системы инвертора такова:

$$\begin{aligned} \text{БЗУ (А)} &= \text{выход инвертора (ВА)} \times \\ &\times 100 / \text{напряжение входа} \times \\ &\times \text{эффективность преобразования} + 1,15 \times \\ &\times \text{емкость батареи (А ч)} / \text{желаемое время перезарядки}. \end{aligned}$$

Выход батарейного зарядного устройства должен быть пересчитан с

учетом высоты места и окружающей температуры. Эти требования должны признаваться важными, особенно тогда, когда пользователь устанавливает соответствующие условия. Большой, чем необходимо, рейтинг может потребоваться, чтобы компенсировать уменьшенную емкость. Типичные кривые для пересчета выхода зарядного устройства показан на рис. 13.8.

13.3.4. Емкость батареи

Требуемая емкость любой батареи, время службы, должно быть определены с учетом следующего:

- уровня потребления в амперах;
- расчетного времени потребления;
- до какого конечного напряжения допустим разряд;
- при какой рабочей температуре.

Емкость батареи зависит не только от размера и длительности каждой нагрузки, но также от последовательности, в которой данная нагрузка подключается.

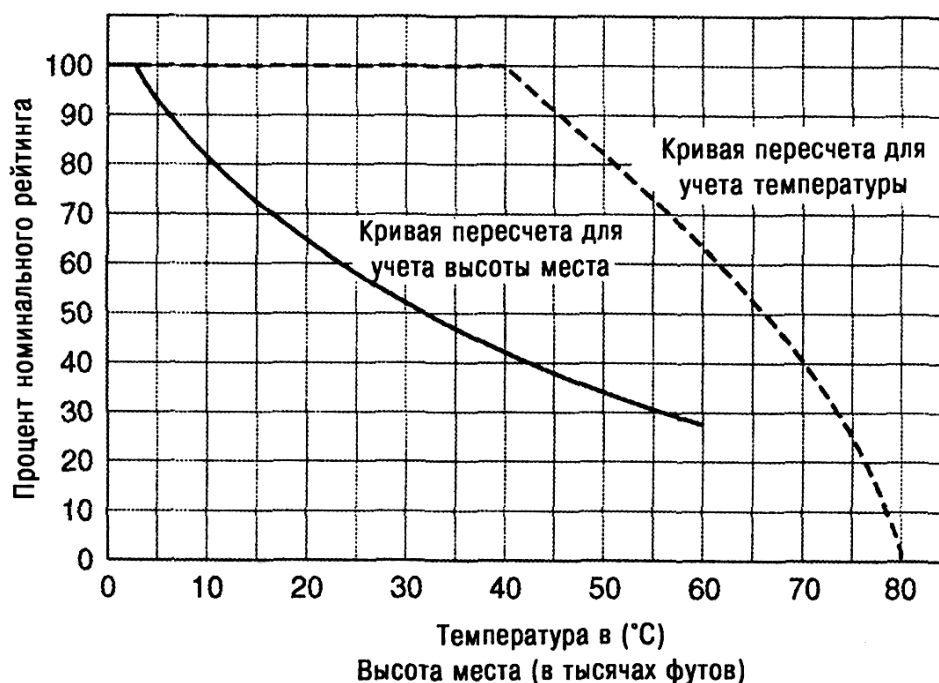


Рис. 13.8. Кривые для пересчета выхода зарядного устройства для учета высоты места и температуры.

Емкость батареи выбирается для поддержки критической нагрузки до тех пор, пока эта критическая нагрузка не будет сброшена в приказном порядке, или восстановится основное питание, или не будет запущен и подсоединен альтернативный источник резервного питания (система мотор-генератор). Вместо того, чтобы покупать батарею большой емкости, можно рассмотреть возможность покупки резервного мотор-генератора.

Батарейная система питания должна выбираться на основе данных производителя для конкретных применений, работающих в известном температурном диапазоне. Большинство показателей в А×ч приведено для температуры +25°C и требуется снижать эти показатели при работе при пониженных температурах. Некоторые производители уменьшают показатели свинцово-кислотных батарей, измеренные при температуре +25°C, на 60% при снижении температуры до -18°C.

Емкость в А×ч уменьшается при увеличении скорости разряда. Поэтому простое суммирование различных нагрузок (при использовании кривых ток-время для оценки емкости) может привести к выбору батареи меньшего, чем следует, номинала. При изменяющихся нагрузках, суммирование различных нагрузок нужно проводить следующим образом:

$$AH = A_1T_1 + A_2T_2 + \dots + A_nT_n$$

где AH — ампер-часы, A — нагрузка в А, T — время в часах.

Если может быть большая скорость разряда в конце цикла разряда, то нужно выбирать батарею большей емкости. Поэтому, для того чтобы подтвердить адекватность выбора батареи, она должна проверяться, начиная от начала разрядного цикла путем вычитания энергий (AT), при удалении каждого типа нагрузки, для того чтобы определить, осталась ли адекватная емкость для конечного интервала нагрузки.

Практика показывает, что свинцово-кальциевым батареям требуется от нескольких дней до нескольких недель, для того чтобы, после разряда до конечного напряжения, вернуться к совершенно одинаковым зарядам на всех элементах.

Возможно, что для ситуаций с длительным и частым пропаданием основного питания, требуются другие батареи, так как может оказаться, что не будет достаточно времени для полной перезарядки между пропаданиями питания, если только не прибегать к увеличению зарядного напряжения за пределы нормально допустимого. Можно было бы рассмотреть свинцовые батареи Плана и свинцовые батареи с многополостными элементами, но они используются очень ограниченно. Поэтому они и не были показаны в табл. 13.4 [13.4].

Таблица 13.4

Основные отличия между разными типами батарей.

| Тип батареи | Конструкция | Типичные характеристики |
|-----------------------|---|---|
| Свинцово-кальциевая | Пастированные свинцово-кальциевые положительные пластины, сернокислотный электролит. | Срок службы 12-15 лет, меньше при высоких температурах, многократных или глубоких разрядах. Минимальные среди свинцовых батарей потери воды и минимальная стоимость. |
| Свинцово-сурьмянистая | Пастированные свинцово-сурьмянистые положительные пластины, сернокислотный электролит. | Срок службы 12-15 лет, хорошо приспособлен к циклическому характеру нагрузки. Имеет среднюю стоимость. |
| Никель-кадмиевые | Конструкция с небольшими (карманными) пластинами, никелевые положительные пластины, кадмиевые отрицательные пластины, гидроксид калия в качестве электролита. | Срок службы 20-23 года, хорошо приспособлен для высоких или низких температур, коротких, быстрых, глубоких или с большим числом циклов разрядов. Может быть быстро перезаряжен. Имеет максимальную стоимость. |

Замечание. Конец срока службы батареи определяется следующим образом: когда перезаряжаемый элемент был полностью перезаряжен и разряжен в процессе теста под нагрузкой и не смог обеспечить 80% своей номинальной емкости, его срок службы считается законченным.

13.4. Питание удаленных пунктов

Существует ряд обстоятельств, когда требуется обеспечить

дистанционное снабжение питанием удаленных мест, где нет собственного источника питания. Существуют также ситуации, когда мы хотим обеспечить свое питание, нежели использовать питание от местного источника. В ряде случаев осуществление этой идеи не только возможно, но и необходимо, если мы хотим обеспечить надежную и высоко доступную систему связи. Если регенератор, оптический усилитель, или мультиплексор ввода-вывода, теряют питание, то отказывает вся система, сформированная как линейная цепь, до тех пор, пока не будет сформирована конфигурация, использующая APS.

Удаленный объект должен обеспечить себе собственное питание, когда нет возможности получить его от местных источников. Желательно также иметь собственное питание, если местное питание плохого качества. Под плохим качеством мы понимаем питание, при котором плохо регулируется напряжение, возникает много переходных процессов и других дефектов питания, и, как следствие, много сбоев сервисного обслуживания.

Мы можем пожелать запитывать ВОСП за счет доставки питания по оптическому кабелю, в котором для этой цели предусмотрена медножильная пара. Это, конечно, убирает одно из преимуществ оптического кабеля - отсутствие токовых петель по земле питания. Медножильная пара добавляет такую петлю в ВОК.

Метод подачи питания на удаленный узел должен быть прост, экономически эффективен и иметь MTBF-период на много лет.

13.4.1. Газотурбинные генераторы питания

Одна из полностью замкнутых систем состоит из системы сжигания газа пропан, парогенератора, турбогенератора, конденсора с воздушным охлаждением, выпрямителя, системы аварийной сигнализации и управления, причем все расположено в отдельном боксе. Такой единый блок может обеспечить от 400 до 3000 ватт отфильтрованного постоянного тока в течение 24 часов на срок до 25 лет при очень низком уровне обслуживания и

без капитальных ремонтов.

Этот блок использует герметически закрытый генераторный узел, который содержит только одну аккуратно вращающуюся часть: вал, на котором смонтировано колесо турбины и ротор турбогенератора без щеток. Вал турбогенератора поддерживается гидродинамическими подшипниками, которые устраняют контакт металл-металл, обеспечивая годы эксплуатации без проблем. Надежность такого узла (на уровне 95% вероятности) порядка 200 000 часов (MTBF).

Для того чтобы улучшить надежность до величины доступности выше, чем 99,9999%, два газотурбинных узла объединяются параллельно и работают на одну шину питания, причем каждый турбогенератор нагружается на половину требуемой мощности. Если что-то происходит с одним из узлов, турбогенератор второго узла автоматически берет на себя всю нагрузку.

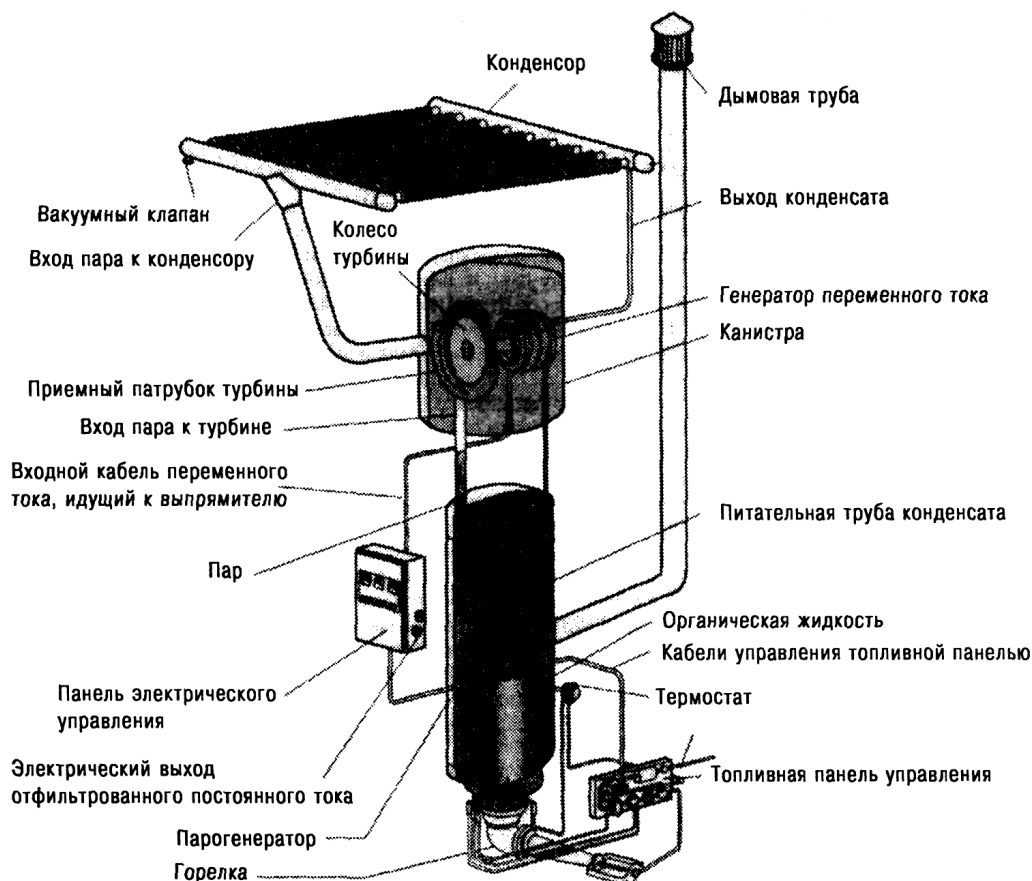


Рис. 13.9. Рисунок блока газовой турбины компании Ormat в разрезе. (С разрешения компании Ormat Corp. [13.5])

На рис. 13.9 приведен рисунок такого блока в разрезе с узлом газовой турбины. Этот рисунок показывает горелку, нагревающую органическую рабочую жидкость в парогенераторе, где происходит парообразование и расширение пара, вытекающего через колесо турбины и создающего, таким способом, крутящий момент вала, приводящего в движение генератор. Пар затем проходит в конденсор, где и охлаждается, превращаясь снова в жидкое состояние и снова приводя в движение парогенератор, охлаждая, тем самым, генератор переменного тока и смазывая подшипники. Этот цикл продолжается до тех пор, пока тепло нагревает парогенератор. В силу того, что стальной сосуд, содержащий жидкость/пар, герметически закрыт, органическая жидкость на расходуется в процессе работы.

Рабочая жидкость не может изменить климатические условия за пределами замкнутого сосуда. Этот турбогенератор производит трехфазный переменный ток, который затем выпрямляется и фильтруется. Мощность постоянного тока регулируется при изменяющихся условиях нагрузки, путем автоматического управления количеством топлива, подаваемого в горелку.

Система снабжена цифровым блоком управления, который обеспечивает дистанционное управление и мониторинг, а также управление безопасностью функционирования, для предотвращения от любых нештатных ситуаций [13.5].

13.4.2. Топливо сберегающая альтернатива

Другим примером системы питания с дистанционным управлением является система, объединяющая солнечные элементы, систему бесперебойного питания и блок с газовой турбиной. Первичным источником были бы солнечные элементы, питающие систему батарей бесперебойного питания. Параллельно с солнечными элементами можно было бы подключить блок с газовой турбиной. Определение размера батареи в этой конфигурации - жизненно важно. Пришлось бы использовать компромисс между частью общей электрической мощности, взятой у системы, частью

входной мощности, взятой у солнечных батарей, и частью, требуемой от газовой турбины. Батарейное питание должно использоваться в ночное время и при облачной погоде. Конфигурация, использующая батарею достаточно большой емкости и поддержанная солнечными элементами достаточно большой мощности, возможно оставила бы газовой турбине роль источника резервного питания.

ГЛАВА 14 ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МЕДНЫЕ ЖИЛЫ И ОПТОВОЛОКНО

14.1. Введение

Оптоволоконный кабель, как среда передачи, занимает очень важную нишу в передаче сигналов кабельного телевидения (КТВ). Передача видеоизображения составляет основу сервиса КТВ. Цель передачи по КТВ — доставить пользователю четкий видеосигнал с отношением сигнал-шум больше 46 дБ. Это значение отношения сигнал/шум является большим по сравнению с тем, что имеет место в канале с данными или голосом. Можно сказать, что если доставка видео будет работать надлежащим образом, то остальные сервисы будут заведомо в норме.

Оптическое волокно, как среда передачи для КТВ, было введено в употребление в 1990. Рациональность его введения и архитектура различных сетей обсуждается в этой главе. В ней также дается обзор истории развития гибридных сетей КТВ и их организации, для обеспечения потребителей двусторонней передачей, а также рассматривается архитектура гибридных сетей и соединения на последней миле.

14.2. Основные сведения

На рис. 14.1 приведена схема сети КТВ до введения ВОК. Она существенно упрощена. Средой передачи в ней служил коаксиальный кабель, учитывая ее широкополосные свойства. Видео/ТВ относятся к системам с широкополосным сигналом, так как здесь используется стандартный NTSC телевизионный радиосигнал с шириной полосы 6 МГц, как показано на рис. 14.2.

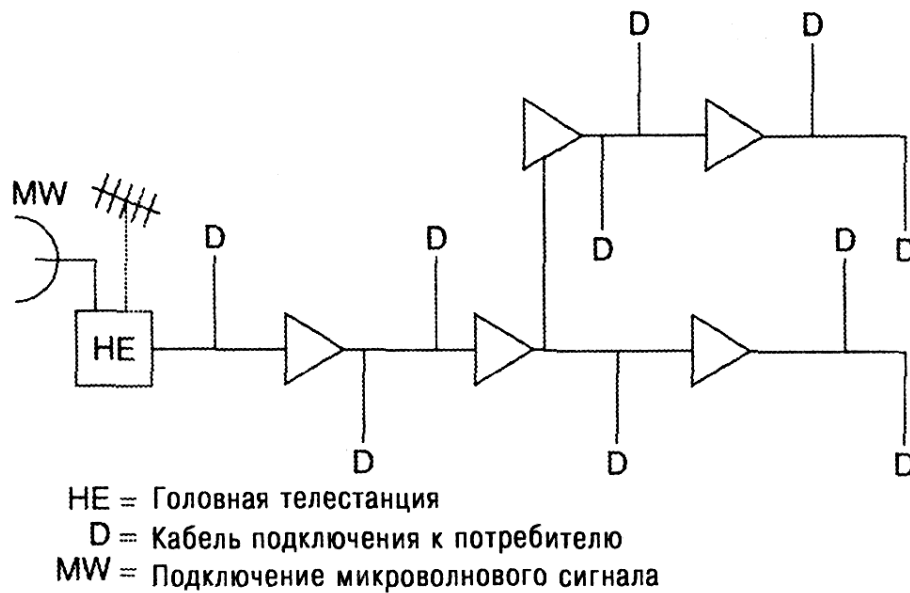


Рис. 14.1. Схема обычной системы КТВ до 1970. Подсистема передачи полностью основана на коаксиальном кабеле и электронных усилителях. Источники программ на головной телестанции работают в микроволновом диапазоне, используют кабельный сигнал и магнитную ленту. Спутниковый прием стал использоваться позднее.

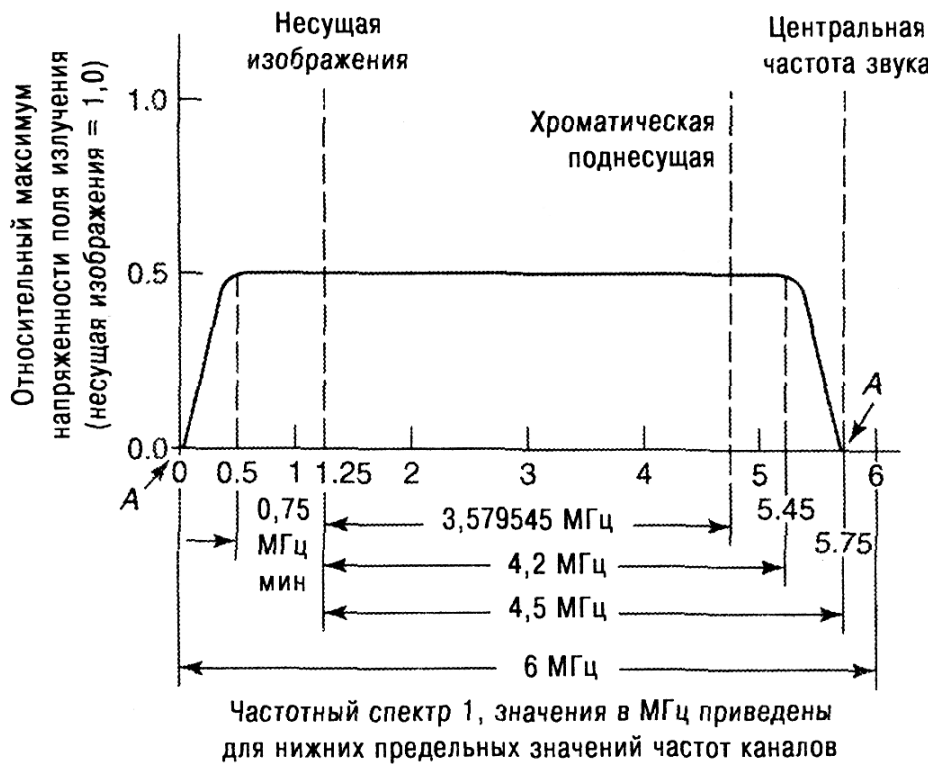


Рис. 14.2. Амплитудно-частотная характеристика телевизионного сигнала. Ширина полосы равна 6 МГц (взято из [14.4] FCC Part 73.699, рис. 5, с. 240)

В системах КТВ головная телестанция является местом, где собираются все программные и другие сигналы и форматируются для последующей подачи в кабельную сеть. Головные телестанции отличаются от других наличием нескольких спутниковых антенн вокруг них. Сигналы КТВ, сформированные головными телестанциями, доставлялись тогда потребителям по коаксиальным кабелям. Системы КТВ требовали широкополосных усилителей для поддержания нужного уровня сигнала на всем пути до потребителя. Каждый усилитель нарабатывал свой собственный шум и вызывал искажения сигнала на пути к потребителю. Эти шумы и искажения аккумулировались. Следовательно, существовал предел числу последовательно включенных усилителей, которое могла поддерживать система, пока сигнал не становился бесполезным для потребителя. В работе [14.1] сообщается, что это число равно (примерно) 20. Однако в ней же утверждается, что максимальное число последовательно включенных усилителей может достигать 50 для узкополосных систем, где усилители имеют низкий уровень шума. В стандартной системе ТВ можно ожидать, что расстояние между усилителями равно 600 м. Следовательно, самая длинная система КТВ может простираться на 30 км или меньше. Это говорит о том, что максимально область обслуживания системы КТВ может базироваться только на одну головную телестанцию.

Было найдено, что оптимальный коэффициент усиления одного широкополосного усилителя составляет примерно 22 дБ. Увеличение этого усиления выше указанного значения приводит к тому, что интермодуляционные продукты увеличивают нелинейность, которая быстро становится чрезмерно большой. Коэффициент шума обычного широкополосного усилителя, который будет использоваться в наших расчетах, составляет примерно 8 дБ [14.1, 14.3, 14.5], хотя нам кажется, что лучше использовать цифру 10 дБ.

14.2.1. Логическое обоснование

Напомним, что коаксиальный кабель представляет изолированную

радиочастотную среду передачи. В силу своей конструкции и электрических характеристик, он имеет возможность переносить выделенный частотный спектр. Этот спектр обособлен от того спектра, что есть в воздушной среде. Одно из его свойств в том, что он ведет себя так, как если бы он передавался по воздуху. Это значит, что телевизионный приемник, присоединенный к кабелю, ведет себя так, как если бы он был присоединен к антенне. Поэтому владелец ТВ приемника может стать пользователем кабельной сети, не тратя денег на приобретение дополнительного электронного оборудования. Если пользователь расторгнет договор, то у него не останется никакого (не нужного) оборудования.

Учитывая, что спектр КТВ находится «внутри» кабеля, системы КТВ могут использовать те частоты, которые предназначены в радиочастотном спектре (при передаче по эфиру) для других целей. Это «другое» использование происходит без создания каких-то помех для обычной (по воздуху) ТВ передачи. Конечно, нужно принять меры к тому, чтобы предотвратить влияние воздушной передачи на кабельную передачу или ответить на вопрос: может ли воздушная передача влиять на кабельную передачу? Итак, внутри коаксиального кабеля мы имеем систему КТВ, свой особый спектр со своими сигналами.

Спектр КТВ непрерывный в сторону увеличения частот (от канала 2 — 54 МГц, в США), тогда как обычно излучаемый спектр — разрывный. Преобразованием спектра, позволяющим заполнить нормально не занятые части спектра с помощью оборудования трансляции стандартных частот, занимается головная телестанция. Эти другие 6 МГц каналы поступают на нее со спутникового фидера или от РРЛ, которые доставляют удаленные ТВ сигналы, передаваемые по воздуху.

Одним из основных недостатков коаксиального кабеля являются его потери, которые растут с частотой не линейно, а почти экспоненциально. Ослабление сигнала коаксиального кабеля изменяется, как корень квадратный из частоты. Полдюймовый (12,7 мм) алюминиевый кабель имеет затухание 1

дБ на каждые 30 м на частоте 181 МГц, для дюймового (25,4 мм) кабеля это затухание уменьшается до 0,59 дБ. Потери на частоте 216 МГц (13 канал в США) в 2 раза выше, чем на частоте 54 МГц (2 канал в США), так как разница в частоте в 4 раза. Следовательно, нужно использовать устройства выравнивания частотной характеристики.

Все это существенно отличается от оптоволокна, где нет такого увеличения потерь с изменением длины волны (или частоты). Как мы упоминали ранее, потери волокна в окне 1310 нм имеют порядок 0,35 дБ/км, а в окне 1550 нм - 0,25 дБ/км. Это одна из важных причин того, что оптоволокно так привлекательно для систем КТВ. При использовании АМ модуляции, все, что нам требуется для использования конвертированного сигнала - приемник светового сигнала и усилитель радиосигнала в точке конвертирования. При прохождении по оптоволокну сигнал нарабатывает очень мало накопленных искажений и шума, тогда как при прохождении по коаксиальному кабелю искажения и шум велики. Оптоволокно выигрывает у коаксиального кабеля как среда передачи, хотя линия КТВ с коаксиальным кабелем дешевле, так как для оптоволоконной линии требуется иметь оптический приемник и демодулятор в каждом ТВ приемнике. Чем ближе к оборудованию потребителя мы доведем волокно, тем лучше качество изображения он будет иметь.

Некоторые дополнительные замечания. Активные устройства имеют тенденцию иметь худшее значение показателя МТВФ, чем пассивные. Чем больше усилителей в последовательном соединении (тандеме), тем больше ухудшается МТВФ системы. Это напрямую ухудшает показатели доступности.

Если мы сможем как-то уменьшить число широкополосных усилителей в тандеме, то сможем улучшить показатели качества/ошибок системы, т.е. сможем улучшить отношение сигнал/шум видеосигнала в точке приема у потребителя. Мы также улучшим надежность системы, улучшая МТВФ системы в точке приема у потребителя. Время отказов системы может быть

существенно снижено.

Волоконно-оптический кабель был впервые использован в системах КТВ на магистральных маршрутах. Было установлено, что 32 км магистральный маршрут может работать без использования повторителей или усилителей. На такой длине маршрута ВОК позволяет заменить порядка 30 широкополосных усилителей в схеме с коаксиальным кабелем. На рис. 14.3 показана система КТВ, построенная по схеме доставки сигнала по коаксиальному кабелю. Эта же система, но использующая оптоволоконную магистральную сеть, показана на рис. 14.4. На рис. 14.5 показан один из возможных подходов в оптимизации схемы КТВ, реализованной на ВОК. Этот подход к проектированию систем КТВ основан на том, чтобы построить сеть, использующую не более X усилителей на пути от головной телестанции к любому из потребителей сигнала. На рисунке показан случай $X = 3$.

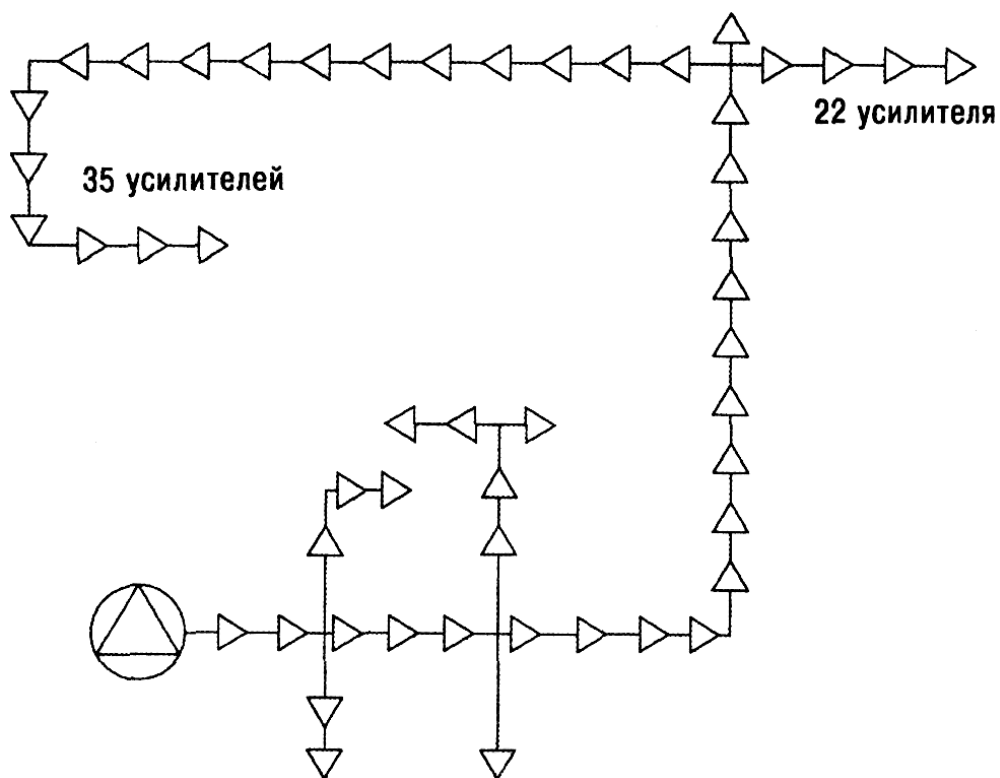


Рис. 14.3. Схема обычной системы КТВ до 1990. Обратите внимание на избыток электронных усилителей, число которых в тандемном соединении достигает 35 (см. [14.8, 14.9]).

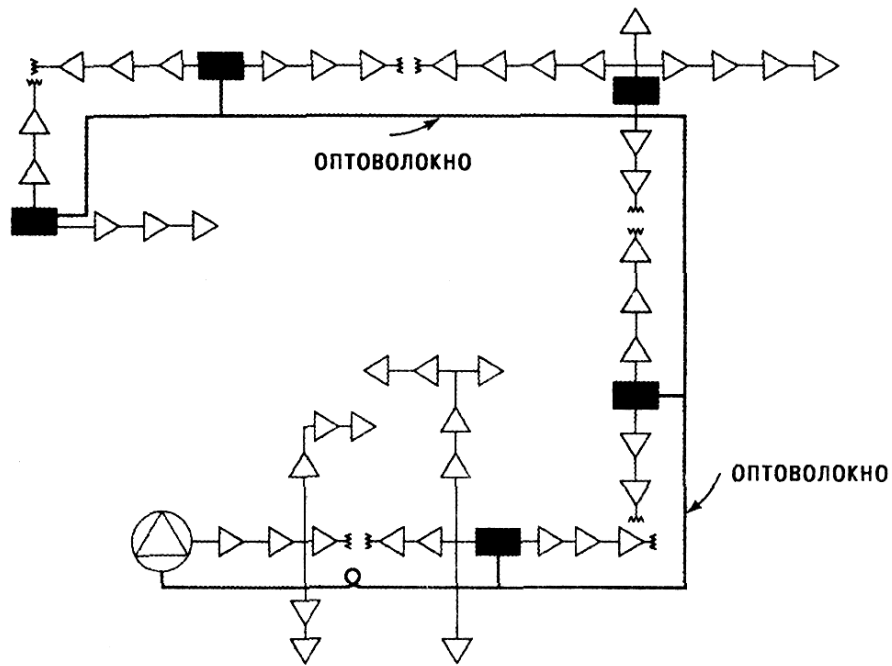


Рис. 14.4. Та же система КТВ, что и на рис. 14.3, но первичное распределение осуществляется с использованием оптоволоконной магистрали. Пролеты на современной версии этой системы будут иметь два волокна для передачи потоков в прямом и обратном направлениях. (С разрешения компании ADC, Minneapolis, MN, [14.8])

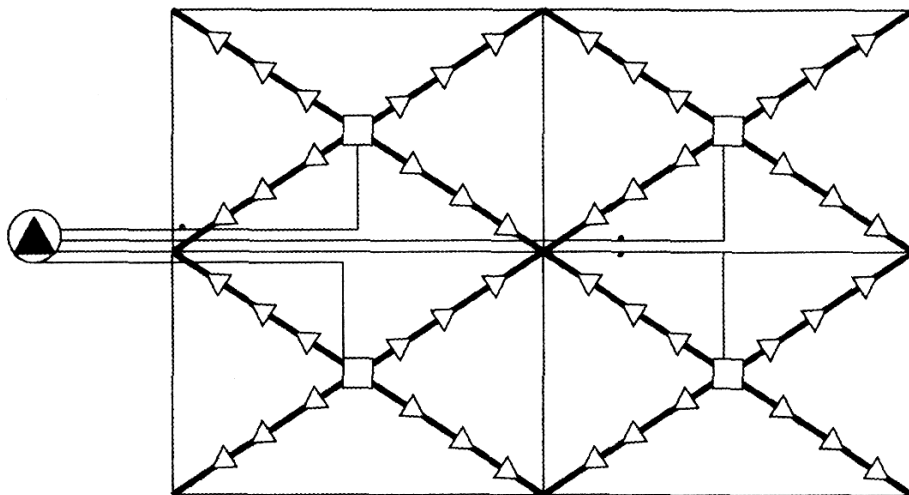


Рис. 14.5. Схема сети КТВ с распределенной архитектурой, использующей не более X усилителей до любого потребителя сигнала. На рисунке показан случай $X = 3$. (С разрешения компании ADC, Minneapolis, MN, [14.8])

14.3. Использование передачи КТВ по волоконно-оптическому пролету КТВ магистрали

Существует три способа передать обычный аналоговый ТВ-сигнал по оптическому сегменту системы передачи КТВ. Наиболее популярным методом является использование амплитудной модуляции. В нем интенсивность сигнала КТВ с шириной полосы 500, 600 или 800 МГц непосредственно модулирует лазерный передатчик. Этот метод очень популярен потому, что практически не требует конвертирования сигнала.

Второй метод технические специалисты КТВ называют «ЧМ», хотя в чистом виде он не имеет отношения к частотной модуляции (ЧМ), (так как фактически для частотного сдвига канала при образовании канальной группы также используется АМ модуляция). С помощью этого метода, частотный сигнал каждого канала КТВ модулирует отдельную поднесущую. В зависимости от конкретной реализации, 8, 16 или 24 таких поднесущих объединяют в группу, интенсивность сигнала которой модулирует (по методу АМ) световой сигнал лазерного диода в передатчике (это похоже на схему частотного мультиплексирования для образования канальных групп при уплотнении аналоговых телефонных каналов, см. [А-20, А-21]). Каждый групповой сигнал связан с отдельным волокном. Если мы, например, хотим передать 64 канала КТВ на распределительный узел и предполагаем использовать группу из 16 поднесущих, то нам потребуется 4 волокна ($16 \times 4 = 64$). Это более сложный метод, чем метод непосредственной (АМ) модуляции, учитывая то, что на стороне конечного пользователя сигнал должен быть обратно конвертирован в стандартный одноканальный АМ формат, совместимый с ТВ приемником.

Так почему же ЧМ метод занимает первое место? Ответ прост, он - единственный метод, который удовлетворяет стандарту EIA/T1A-250C [14.2] для коротких секций с отношением С/Ш = 67 дБ. Этот стандарт является определяющим в США стандартом, гарантирующим высокое качество ТВ

вещания. ЧМ системы имеют еще два преимущества: они значительно меньше подвержены влиянию дисперсии на оптическом сегменте и допускают большую длину волоконно-оптического пролета, чем аналогичные АМ системы.

При обсуждении ниже мы уделим основное внимание методу АМ передачи по волокну.

Третий метод передачи по оптическому волокну — цифровой. Он обсуждается ниже в разделе 14.3.2.

14.3.1. Передача АМ сигнала КТВ по волоконно-оптическому пролету

Пусть мы хотим передать сигнал с отношением сигнал/шум (S/N) 53 дБ, но мы можем измерять только отношение сигнала несущей к шуму (C/N) для выходного сигнала PIN-диода приемника. В этом случае мы можем использовать соотношение:

$$S/N = C/N - 4,1 \text{ дБ (не взвешено)} \quad (14.1)$$

Добавляя улучшение, получаемое при взвешенном измерении, 6,8 дБ, получаем:

$$S/N = C/N + 2,7 \text{ дБ (взвешено)} \quad (14.2)$$

Это имеет место только для систем АМ с частично подавленной боковой полосой (АМ-ЧПП) при глубине модуляции 87,5%. При использовании этих соотношений нужно помнить, что для S/N сигнал измеряется по пиковому значению, а шум — по среднеквадратичному, а для C/N — сигнал и шум измеряются по среднеквадратичному значению.

Подставляя в соотношение (14.2) значение S/N=53 дБ, получаем, что эквивалентное ему значение C/N=50,3 дБ.

Рассмотрим теперь бюджет линии передачи, представленный табл. 14.1. Нам нужно иметь диапазон изменения сигнала 53 дБ, чтобы удовлетворить требуемое соотношение 50,3 дБ. Из таблицы видно, что мы имеем очень небольшой запас мощности.

Пример бюджета мощности для АМ линии

| Показатель или параметр | Значение | Комментарий |
|--|------------------------|---|
| Выход лазера (дБм) | +7 дБм ^{а)} | Расширение для лазера |
| Нижняя граница шума приемника (дБм) | -58,7 дБм | |
| Порог приемника для C/N=50,3 (дБ) | -8,4 дБм ^{б)} | Принято для обеспечения S/N = 53 дБ |
| Избыток бюджета линии | 15 дБ | |
| Запас 2 дБ, который нужно оставить | 13 дБ | Избыток |
| Допустимые общие потери при 0,25 дБ/км | 10 дБ | $\lambda = 1550$ нм, 2 дБ для сростков и разъемов |
| Потери на сростки и разъемы: на длине 40 км | 1,52 дБ | Потери, вносимые сростком 0,08 дБ |
| (19 сростков для секций по 2 км и 0,08 дБ/сросток) | 0,48 дБ | Общие |
| Потери на оптические разъемы | 1,0 дБ | Дополнительные для формирования запаса |

^{а)} Взято в предположении длины линии 40 км без регенератора и усилителей

^{б)} Это значение кажется большим, учитывая что перед этим мы имели дело с порогом -23 дБм и ниже до -40 дБм. Принципиальная причина в том, что тогда мы полагали, что отношение C/N=15 дБ. Здесь мы имеем дело с отношением C/N=50,3 или выше, это большая разница, она обусловлена ТВ приемом.

Очень большое значение S/N (53 дБ) при C/N (50,3 дБ) существенно сужает возможности увеличения длины пролета или запаса в бюджете мощности (например, в нашей ситуации это только 2 дБ). Часто выход лазеров устанавливается на уровень не выше 0 или 1-2 дБм, чтобы увеличить срок службы. Конечно, на отметке 40 км мы можем установить усилитель или регенератор, чтобы увеличить длину пролета.

При отношении C/N равном 50 дБ можно рассчитывать на следующий уровень искажений:

- комбинированные искажения второго порядка (CSO): -62 дБн;
- комбинированные искажения третьего порядка (CTB): -65 дБн.

Если на приемной стороне нужно использовать разветвитель оптического сигнала, то может потребоваться оптический усилитель для компенсации потерь, вносимых разветвителем. Например, если используется разветвитель: 1:2, то можно ожидать уровень вносимых потерь порядка 3,5 дБ.

14.3.2. Комментарии и обсуждение бюджета мощности волоконно оптической линии

Из табл. 14.1 видно, что запас в бюджете очень мал (2 дБ), такой запас опытные инженеры ВОСП обычно считают недостаточным. Мы можем получить такой запас на пролете в 40 км, если только заставим лазерный диод работать на пороге допустимого уровня. Если же проектировщик оптического сегмента решит использовать ЧМ метод, а не АМ метод, то он сможет обслуживать пролет длиной порядка 60 км и обеспечить запас в 4 дБ.

Мы упомянули три метода передачи сигналов КТВ по ВОК. Третий из них — цифровой. Так как используемый нами цифровой поток не имеет сжатого видео, то мы не очень беспокоимся за уровень BER. Не сжатое видео обычно содержит много избыточной информации. Поток бит может быть регенерирован. Фактически он регенерируется в каждой комбинации: передатчик-приемник, через которую проходит битовый поток. Если нужно еще больше увеличить длину пролета, следует рассмотреть возможность установки регенератора. Однако, если в терминальной точке уровень BER будет 10^{-5} или лучше, то достаточно использовать широкополосный усилитель, чтобы привести битовый поток к нужному уровню BER.

Основной недостаток использования цифрового сигнала на ВОСП — высокие затраты, в частности, из-за необходимости иметь АЦП и ЦАП конверторы для оцифровки ТВ сигнала. Для получения более высокого качества видеобразия (особенно для улучшения разрешающей способности) есть смысл использовать 10-битное, а не 8-битное кодирование.

В табл. 14.2 приведен бюджет мощности обычного звена ВОСП до

потребителя в гибридной сети с использованием АМ метода. Лазерный диод передатчика обеспечивает уровень выхода в волокно порядка +5 дБм. Допустим, что нам нужно передать сигнал на 10 км. Можно проверить для передачи две длины волны: 1310 и 1550 нм. Мы можем также использовать WDM технологию для передачи каждой группы каналов по отдельной длине волны. Мы установили порог C/N на входе PINFET приемника на уровне -12 дБм, так чтобы получить отношение S/N порядка 67 дБ. Используя простое алгебраическое сложение, можно подсчитать, что для инжиниринга звена передачи остается +5 дБм (выход лазера) и -12 дБм (порог приемника), т.е. 17 дБ (+5 — (-12)= 17). В табл. 14.2 эти операции показаны в табличной форме.

Таблица 14.2

Бюджет мощности линии модельной ВОСП с АМ -другой подход

| Показатели/параметры | Значение | Комментарий |
|---|----------|------------------------------|
| Выход лазера | +5 дБм | несущая 1550 нм |
| Потери на разъемах | 1,0 дБ | 2 разъема с 2 сторон |
| Потери волокна, 0,35 дБ/км | 3,5 дБ | ОВ G.652 + сростки для 10 км |
| Порог приемника PINFET | -12дБм | обеспечивает S/N = 67 дБ |
| Диапазон инжиниринга | 17 дБ | +5- (-12)= 17 дБ |
| Потери от дисперсии | 1,0 дБ | |
| Запас в бюджете | 11,5 дБ | 17- 1 -3,5- 1,0= 11,5 дБ |
| Запас слишком велик. Варианты: уменьшить выход лазера, увеличить длину линии передачи | | |

Мы рекомендуем выражать бюджет линии в табличной форме, как это показано в табл. 14.2. В этом случае методика расчета становится более прозрачной для тех, кто будет потом иметь с этим дело, например, при составлении отчетов. Мы также рекомендуем в последнем случае заранее размещать нужные указания/комментарии, как это мы делали выше.

14.4. Установка волоконно-оптического оборудования как можно ближе к ТВ приемнику пользователя

Узел сети КТВ - это точка, где осуществляется преобразование сигнала. Оптический сигнал может быть преобразован в электрический, или, наоборот, электрический сигнал может быть преобразован в оптический. В нашей модели оба типа преобразования имеют место.

Наша цель - довести волокно как можно ближе к ТВ приемнику потребителя и сделать это с минимальными затратами. Существуют такие географические точки на сети, где точка доступа электрического сигнала покрывает зону доступности определенного числа резидентов. Число таких резидентов может быть от 50 до 10000. Прежде чем переводить такую сеть на двусторонний режим работы, нужно убедиться, что в зоне доступности находится от 1000 до 2000 резидентов. В ранних системах такого типа, узел осуществлял преобразование оптического сигнала в электрический, который через систему разводки сигнала и обслуживал непосредственно многих резидентов. Оптический сигнал от терминальной точки оптической магистрали может быть разветвлен оптически и доведен ближе к группам пользователей, прежде чем он будет преобразован в электрический сигнал, совместимый с обычным кабельным сигналом КТВ. Эти узлы помечены черными квадратами на рис. 14.4. Напомним, что целью сети, приведенной на этом рисунке, было использовать не более 3 усилителей для достижения любого пользователя. Это разительно отличается от того случая, когда максимально требовалось 35 усилителей для достижения удаленного пользователя.

До сих пор в рассуждениях мы исходили из того, как минимизировать число широкополосных усилителей, необходимых для того, чтобы достичь любого пользователя. Как мы отмечали раньше, при этом достигаются две цели:

1. Минимизируется число усилителей, включаемых последовательно, уменьшается аккумулярованный шум и достигается лучшее соотношение

сигнал/шум в точке размещения оборудования потребителя.

2. Улучшается системная надежность, так как существенно уменьшается число последовательно включенных усилителей.

Мы можем добавить третье улучшение: двунаправленную схему функционирования. До этого революционного изменения, КТВ представляли собой однонаправленную (провайдер услуг — потребитель) систему развлечений. Преобразование в двунаправленную систему сделало КТВ настоящим конкурентом на рынке цифровых услуг, наряду с такими технологиями, как LMDS, MMDS, ADSL и УКВ.

14.5. Двунаправленная схема КТВ

Для двунаправленной работы было бы нормальным использовать столько услуг, сколько возможно. Существующая система развлечений была оставлена, как есть. На коаксиальном кабеле или волокне с АМ системой она была представлена каналами ТВ, распределенными последовательно 6 МГц полосами, начиная от 54 и до 870 МГц. Проектировщики в первую очередь обратили внимание на незанятую полосу от 5 до 40 МГц, которая могла бы быть занята для потока от потребителя к провайдеру (обратный трафик). Предполагалось использовать эту полосу частот прежде всего для Интернет, а затем и для передачи данных по IP или ATM, для VPN, интерактивного видео и телефонии.

Пытаясь извлечь максимум возможного из указанной полосы, нужно, прежде всего, ответить на вопрос: достаточна ли она для обслуживания сотен пользователей одновременно? Пусть у нас есть 100 пользователей и каждому требуется полоса 1 МГц для связи с провайдером. Получается, что нужно 100 МГц, которые мы не можем предоставить (имея всего 35 МГц). При таком подходе мы сможем обеспечить в час наибольшей нагрузки только 35 пользователей. Можно сделать некоторые наблюдения в этой ситуации,

когда 100 пользователей требуют передачи обратного трафика:

а) Не все 100 пользователей одновременно требуют такой трафик.

б) Мы можем грубо считать, что 1 МГц полосы эквивалентен скорости передачи в 1 Мбит/с. Предположим, что 1 Мбит/с слишком большая скорость для сервиса Интернет в этом направлении. Наибольшая скорость обычно требуется для трафика, идущего из сети Интернет — от провайдера к пользователю (прямой трафик), тогда как в обратном направлении эта скорость может быть значительно уменьшена, пусть, например, она будет не более 100 кбит/с.

в) В качестве метода доступа к провайдеру можно применить метод множественного доступа с временным разделением (TDMA). Эта техника доступа может обслуживать больше пользователей, учитывая взрывной характер обратного трафика (в Интернет).

г) Двухнаправленная архитектура КТВ должна включать узлы с емкостью доступа не более 500 пользователей. Конечно, меньшие числа более предпочтительны, но они могут быть не выгодны экономически.

Характер функций узла, направляющих прямой трафик (к пользователю) показан на рис. 14.6.

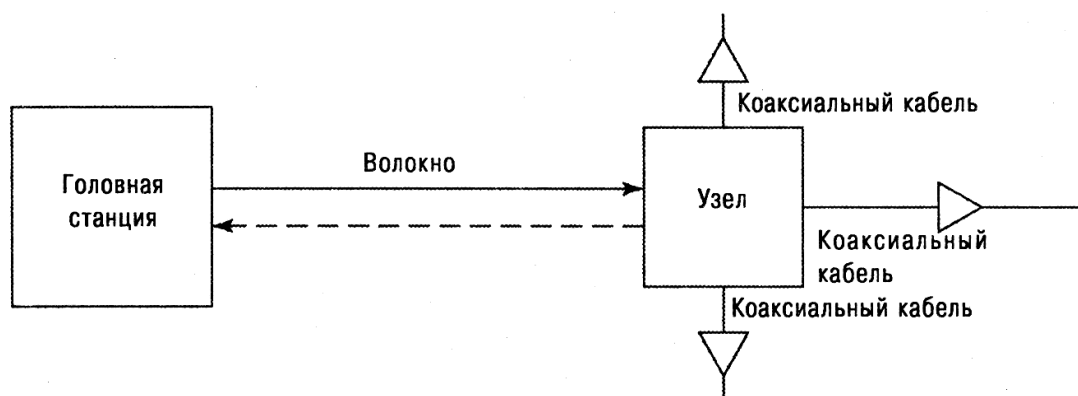


Рис. 14.6. Функциональная схема узла КТВ, показывающая только прямой трафик

Используется и передача трафика от оборудования пользователя к головной станции. Для наших рассуждений будем считать, что весь трафик

цифровой. Предположительный тип трафика, скорость передачи, ожидаемое направление передачи (симметричная передача или асимметричная) детально представлены в табл. 14.3.

Таблица 14.3

Ожидаемые тип трафика, скорость передачи, направление передачи (симметричная передача или асимметричная, непрерывная или имеет взрывной характер)

| Тип трафика | Скорость Передачи | Направление трафика | Симметричный или асимметричный | Непрерывный или взрывной | Комментарий |
|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|
| Обычное ТВ | 1,544Мбит/с | Прямой | В одну сторону | Непрерывный | MPEG-2 |
| HDTV | 20 Мбит/с | Прямой | В одну сторону | Непрерывный | См. [14.1] |
| Интернет | 2 Мбит/с 128 кбит/с | Прямой Обратный | В обе стороны, асимметричный | Непрерывный | |
| Виртуальные сети (VPN) | 256 кбит/с | Прямой и Обратный | Симметричный | Взрывной | |
| В-ISDN/ ATM | 1024 кбит/с | В обе стороны | Симметричный | Взрывной | Частные сети |
| Телефония | 64 кбит/с | В обе стороны | Симметричный | Непрерывный | |
| Frame Relay | 1024 кбит | В обе стороны | Симметричный | Взрывной | ЛВС |

Пользователи минимально требуют передачу голоса и Интернет. Для данного обсуждения примем: телефония — 64 кбит/с, Интернет трафик в прямом направлении — 2 Мбит/с, а в обратном направлении — 256 кбит/с. Если предположить эквивалентность 1 Гц и 1 бит/с, то обратный трафик требует 256 кГц. Используя табл. 14.2 и вновь предполагая 1 Гц ~ 1 бит/с, получим, что одновременно могут пользоваться обратным трафиком 130 пользователей. Если допустить возможность одновременного использования обратного трафика только 50% пользователей, то их число может быть увеличено до 260. В работе [14.1] утверждается, что в обычных системах КТВ с использованием гибридных кабелей число таких пользователей в

расчете на 1 узел может составлять от 1000 до 2000. Наш план тогда не сможет удовлетворить всех пользователей Интернет в час наибольшей нагрузки. Обратный трафик конфигурируется на основе использования TDMA из расчета 4 пользователей на один частотный сегмент. В этом случае можно обслуживать 800-1000 пользователей при передаче обратного трафика в полосе 5-40 МГц, рассчитывая, что в час наибольшей нагрузки не всем пользователям он одновременно потребуется.

14.5.1. Назначение сегментов спектра КТВ для обратного трафика

На рис. 14.7 приведен спектр радиочастот ниже некоторой частоты, занятой отдельными каналами. Прямой трафик (к пользователю) начинается с частоты 54 МГц и увеличивается сегментами по 6 МГц. Обратный трафик (в Интернет) начинается с 5 МГц и продолжается до 40 МГц. Полоса 40-54 МГц считается защитной и служит для изоляции прямого и обратного трафика.

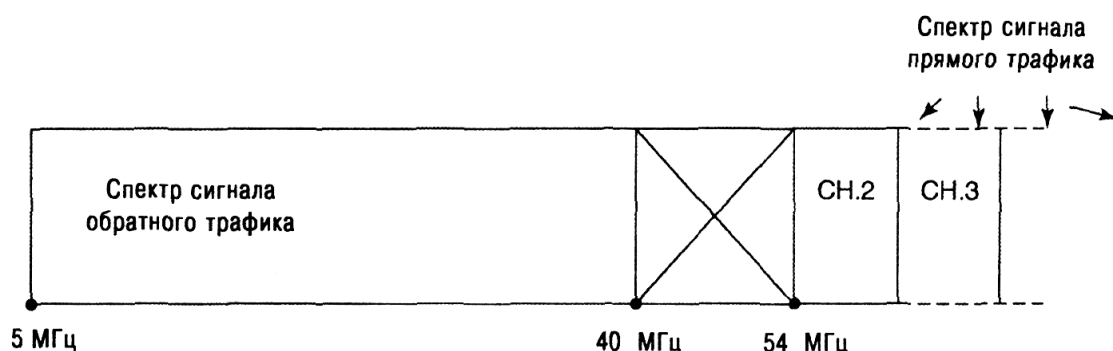


Рис. 14.7. Низкочастотная часть спектра радиосигнала в сервисе КТВ.

Рассмотрим группы пользователей по 250 человек, пусть каждая группа обслуживается одним узлом. Для обеспечения обратного сервисного трафика, каждый узел имеет свой собственный сегмент на коаксиальном кабеле. У нас 4 узла, имеющие сегменты А, В, С и D с полосой 5-40 МГц. Эти сегменты передаются на центральный узел, который конвертирует их в полосы, размещаемые в агрегатной полосе в диапазоне 5-200 МГц. Сформированный агрегатный сигнал далее амплитудно модулирует лазерный диод,

формируя оптический эквивалент этого сигнала. Указанная процедура трансляции агрегатного сигнала показана на рис. 14.8. Каждая агрегатная группа передается в концентратор (хаб) по сравнительно короткому ВОК. Концентратор является интерфейсным устройством типа мультиплексора ввода-вывода, который обрабатывает (мультиплексирует) световые сигналы локальных групп от узлов и передает их на магистральное волокно, связанное с головной телестанцией.

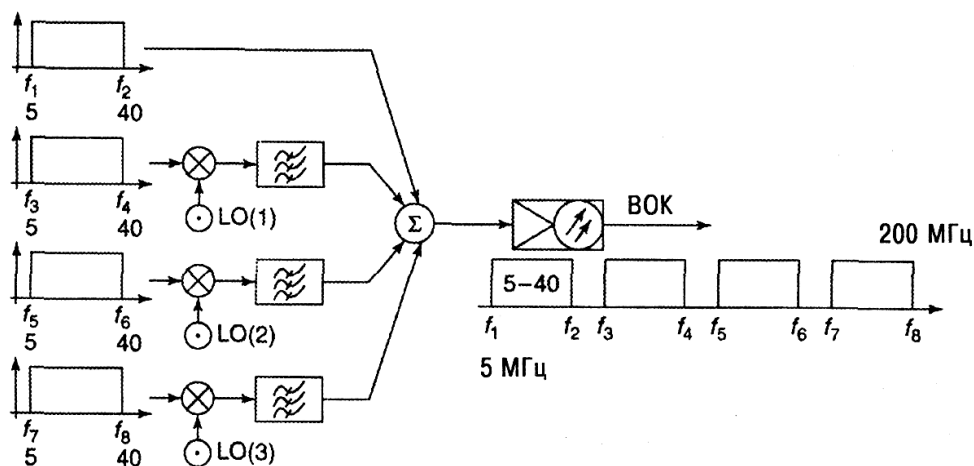


Рис. 14.8. Блок трансляции 4 сегментов групповых спектров, ширина полосы частот каждого сегмента равна 35 МГц.

Магистральный ВОК обычно реализован в виде оптоволоконного кольца для улучшения надежности и доступности. Этот подход иллюстрируется рис. 14.9.

Некоторые реализации таких систем используют технологии SONET или SDH для поддержки кольцевой оптоволоконной архитектуры. Другие могут использовать DOCSIS (спецификация интерфейса передачи данных по ТВ кабелю) или DAVIC (спецификация Совета по цифровым аудиовизуальным технологиям), которые также обеспечивают необходимый формат сигнала, позволяющий использовать оптоволокно (включая технику MAC-адресного доступа). Технологии SONET/SDH не обеспечивают такой доступ.

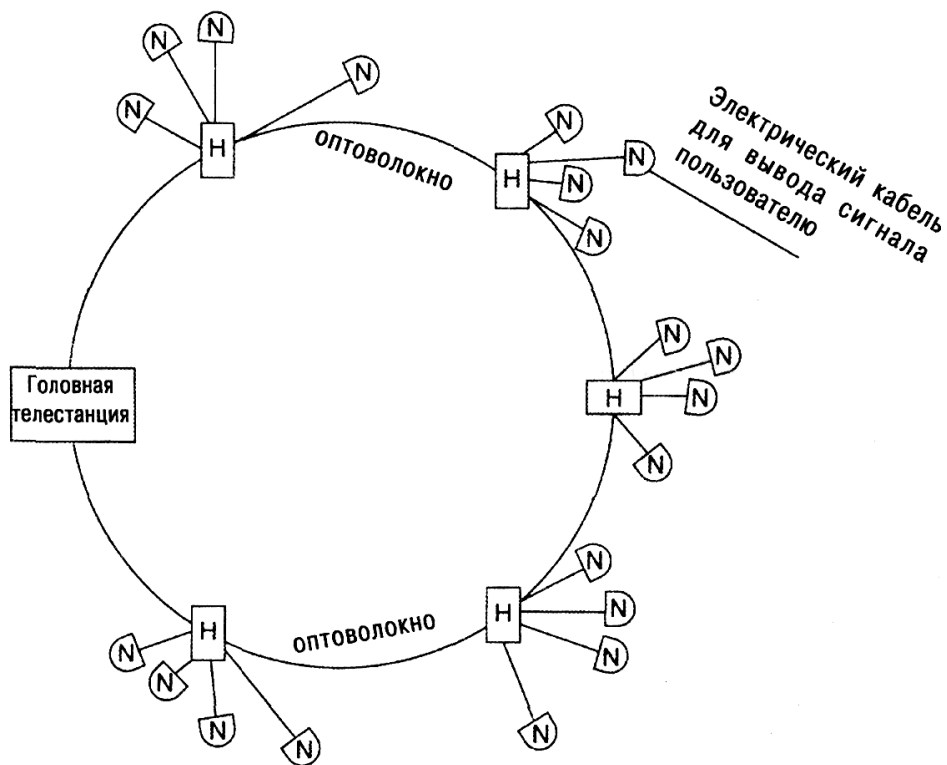


Рис. 14.9. Кольцевая оптоволоконная архитектура, соединяющая головную телестанцию КТВ с различными концентраторами, доставляющими сервис пользователям с помощью системы узлов. Обозначения на рисунке: *H* - концентратор, *N* - узел.

Допустим, что плотность в расчете на узел возросла до 500 для данного географического региона, так что теперь группа из 4 узлов обслуживает 2000 пользователей. Скорость в расчете на несущую осталась прежней — 256 кбит/с (допустим, что используется модуляция BPSK и 1 бит соответствует 1 Гц, т.е. используется полоса 256 кГц). Если мы предположим, что полоса рассчитана на использование синус-квадратного фильтра, то α — 0,25. Наша полоса тогда в расчете на несущую станет 320 кГц. В этом случае, учитывая результаты, полученные выше, 35 МГц полоса может обслуживать только 109 несущих одновременно. То есть, можно будет обслуживать порядка 100 одновременно работающих пользователей (при 100% нагрузке). Причем эти вычисления не включают время на установку/конфигурацию цепей и демонтаж оборудования. Заметим, что здесь предполагается использование

метода множественного доступа с частотным разделением (FDMA), требующего, вероятно, наиболее широкой полосы.

Напомним, что большинство реализованных оптоволоконных сегментов используют два волокна: одно - для прямого трафика, второе - для обратного. Это значит, что нет ограничений на полосу пропускания, тогда как при использовании коаксиальных кабелей необходимо находить компромиссы между требуемой полосой, шумом и искажениями сигнала. Это делает коаксиальный кабель узким местом в тракте передачи.

Указанный раздел описывает средства увеличения числа пользователей в расчете на один узел (имеется ввиду обратный трафик и связанные с ним проблемы). В качестве ориентира рекомендуется начать с достаточно низкой цифры в 250 пользователей на каждый сегмент с коаксиальным кабелем, чтобы иметь возможность адаптироваться к новым сервисам и расширениям клиентской базы.

Ниже приведены те меры, которые могут быть приняты с целью увеличения числа пользователей в расчете на единичный сегмент полосы пропускания.

- Метод доступа: Мы предпочитаем TDMA, хотя CDMA также нужно рассматривать. Таймирование и синхронизация — два важных вопроса в обоих случаях.

- Использование QPSK, а не BPSK, а, возможно, и 8-PSK, дающей, теоретически, 3 бита/Герц. Это одно из наиболее гарантированных решений в плане увеличения числа пользователей.

- Уменьшение скорости передачи обратного трафика в расчете на пользователя с ростом новых сервисов, таких как VPN, сервис IP-сообщений и Frame Relay. Увеличение скорости передачи обратного трафика для быстрой обработки запросов, передаваемых в сеть Интернет. Дополнительную полосу для передачи обратного трафика можно получить путем последовательного контроля полос передачи прямого трафика и переназначения свободных каналов в другие сегменты. Это переназначение

должно осуществляться каналами/блоками по 6 Мбит/с.

Для достижения еще большей емкости, следует обратить внимание на квадратурные методы оптимизации эффективности передачи информации. Эти методы позволяют осуществить такой телевизионный протокол, как DOCSIS. Для прямой передачи он использует методы модуляции 64- или 256-QAM; а для обратной передачи — QPSK или 16QAM. Более подробно об этом см. в руководстве [14.6], а материалы о DOCSIS в работе [14.7].

ГЛАВА 15 ВНУТРИОБЪЕКТНАЯ КАБЕЛЬНАЯ ПРОКЛАДКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

15.1. Введение

Если здание строится для использования в сфере бизнеса или для производственных целей, оно должно быть спроектировано так, чтобы включить кабельную прокладку для целей связи. Должно быть оставлено достаточно места для ее последующего расширения и модификации. Определение «достаточно места» довольно расплывчато и представляет определенную трудность для инженера-проектировщика.

В этой главе мы постараемся помочь советами тем, кто осуществляет прокладку ВОК внутри зданий. Возникают вопросы: как будет использоваться ВОК, что мы хотим от кабельной прокладки? Как только мы на них ответили, нужно определить тип кабеля, который будет использоваться. Еще более важным является то, как сбалансировать использование медножильного кабеля и ВОК. Может быть более экономично использовать медную пару для передачи сигналов с полосой 64 кбит/с, чем делать это с помощью ВОК. С другой стороны, если нам нужно осуществить соединение с 1 Гбит/с системой CSMA/CD длиной 100 м, мы, конечно, выберем одномодовое волокно. Вопросы, которые будут рассмотрены в этой главе, следующие: для чего будет использовано конкретное волокно и каково наиболее экономичное решение, связанное с использованием волокна?

15.2. Диапазон используемых приложений

Примерно до 1975 года диапазон использования телекоммуникационных приложений для бизнеса и в промышленности был

ограничен аналоговой телефонией, использующей неэкранированную витую пару (UTP) для соединения с АТС и остальным миром. Сегодня диапазон таких приложений значительно шире, большинство используемых систем стали цифровыми и передают не только голос, но и данные. Среди таких цифровых систем можно встретить Ethernet (использующий сейчас около 22 разновидностей технологии CSMA/CD) с двумя его современными версиями, использующими скорости 1 и 10 Гбит/с, FDDI, Token Ring, TCP/IP. Кроме того, видео, SONET/SDH, АТМ и, возможно, FC (оптоволоконный канал). Для передачи этих сигналов достаточно использовать многомодовое волокно с диаметром сердцевины 62,5 мкм (см. гл. 2, разд. 2.1.2) и широкополосностью 160 МГц·км в окне 850 нм и 500 МГц/км в окне 1300 нм. Ключевым в наших рассуждениях относительно оптоволоконных устройств в помещении пользователя является то, что расстояния между ними малы, обычно не более 300 м для одного здания. При использовании в кампусной сети или, даже, в сетях класса «метро» (MAN), расстояния не превышают 60 км, если ориентироваться на стандарты ANSI/EIA/TIA-568-B.1 [15.1].

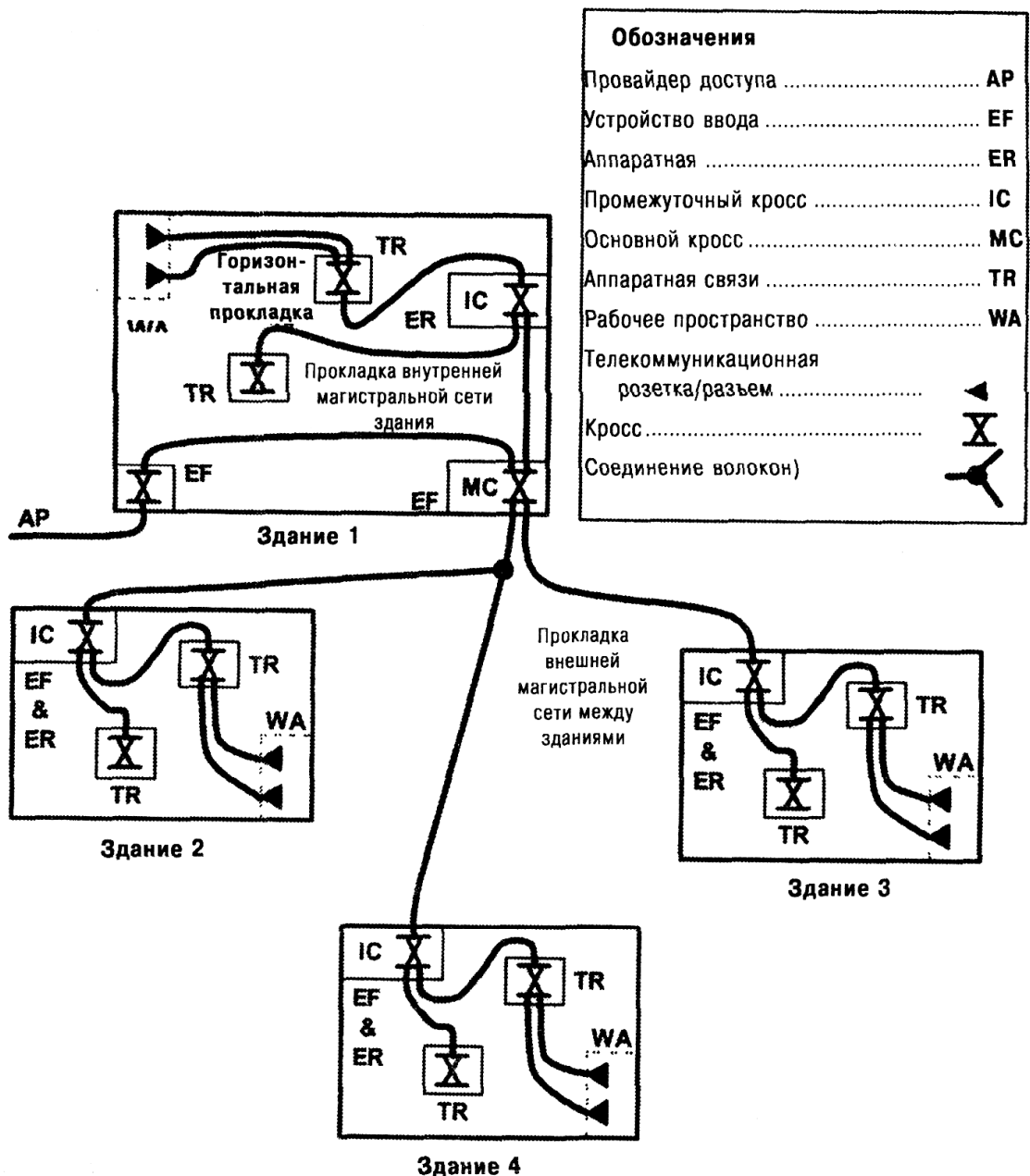
В соответствии с кабельной системой компании Corning Cable Systems [15.2] можно ожидать следующих скоростей передачи данных: передача данных по многомодовому волокну 62,5 мкм, работающему в окне 850 нм, удовлетворяет требованиям по передаче 155 Мбит/с или ниже на расстояние 2 км. Технология АТМ, работающая на скорости 622 Мбит/с, использует многомодовый (62,5 мкм) кабель для передачи сигнала на расстояние до 300 м. Уже это говорит о том, что этот тип волокна может удовлетворить требования большинства сетей, прокладываемых в зданиях. Компания Corning полагает [15.2], что скорость 2,5 Гбит/с (OC-48) может поддерживаться многомодовым кабелем класса 62,5 мкм при длине горизонтальных соединений не выше 100 м. Гибкость, необходимую для всех приложений, развернутых у пользователя, можно обеспечить с помощью гибридной кабельной системы, использующей одномодовое и многомодовое (62,5 мкм) оптическое волокно. Одномодовое волокно, в дополнение к

многомодовому, желательно использовать для кампусной магистральной сети, если расстояния превышают 300 м, а скорость данных выше 622 Мбит/с.

Конечно, многомодовое волокно может работать на скоростях, превышающих указанные нами. Для горизонтальных кабельных участков была установлена предельная длина — 90 м. Причина этого в том, что кроме волокна используется UTP, и этот предел был выбран для него, а затем перенесен на волокно. Нужно также иметь в виду, что ANSI/EIA/TIA-568B. 1-2001 рекомендует использовать СИД в качестве источника светового излучения (передатчика) в местах установки оборудования пользователя. Этот выбор основан на экономии затрат и ни на чем другом. Следовательно, применение волокна 62,5 мкм идеально подходит для использования СИД передатчика, учитывая большую числовую апертуру многомодового волокна, позволяющую собирать световой пучок в большем конусе, чем у одномодового волокна.

15.2.1. Создание вертикальной (магистральной) и горизонтальной кабельной прокладки

Существуют два главных компонента кабельной прокладки в офисе пользователя: *горизонтальная* и *вертикальная* (магистральная) кабельные прокладки. Общая схема прокладки в офисе приведена на рис. 15.1. Как показано на этом рисунке, горизонтальная кабельная прокладка соединяет рабочее пространство и оборудование с *горизонтальным кроссом* (НС). Горизонтальная кабельная прокладка, в общем случае, ассоциируется с кабельным покрытием рабочего пространства на уровне одного этажа. Вертикальная (или *внутренняя магистральная*) кабельная прокладка соединяет кроссы, расположенные на отдельных этажах, как показано на рис. 15.2.



Замечания.

1. Этот рисунок не претендует на всеобъемлющее представление телекоммуникационной кабельной системы и приводится только как типичный пример такой системы.
2. Все кроссы, расположенные в аппаратной связи (TR) на этом рисунке, являются кроссами горизонтальной прокладки (HC)

Рис. 15.3. Типовая кабельная система (с разрешения организаций ANSI/EIA/TIA, см. стандарт [15.1], рис. 1-1, с. 3).

Цель создания вертикальной (внутренней магистральной) сети состоит в том, чтобы соединить главный кросс здания с каждым из телекоммуникационных шкафов в здании. На рис. 15.3 представлена модель типичной

кампусной сети с многими зданиями. Этот рисунок объединяет вместе схему кабельной прокладки на территории пользователя. Волокно выбрано как среда передачи данных внутри здания, благодаря его возможности поддерживать много высокоскоростных линий передачи в кабеле меньших размеров, совершенно не заботясь о перекрестных помехах. Все больше и больше пользователей становятся сторонниками применения ВОК для поддержки телефонных (голосовых) приложений, путем установки небольших учреждений АТС на каждом этаже здания.

15.3. Топология сети

15.3.1. Кампусная магистральная сеть

Кампусная сеть состоит из ряда зданий, соединенных между собой телекоммуникационной связью. К этой категории сетей относятся военные базы, университеты, госпитали, большие промышленные комплексы. Современные коммуникационные элементы, необходимые при создании такого сетевого окружения, которое могло бы удовлетворить пользователя, сложны и дороги. Вся система может быть разбита грубо на следующие иерархические уровни:

1. Кампус;
2. Здание;
3. Этаж здания:
 - а) телекоммуникационный шкаф (ТС);
 - б) рабочее пространство (WA).

На рис. 15.3 показаны эти три уровня. Существует кросс или кроссовая панель, соответствующая каждому уровню. Существует, по крайней мере один, телекоммуникационный шкаф на каждом этаже. Кроссы для оптических волокон и медных пар должны быть физически отделены друг от друга.

МС — *главный кросс*, который обычно располагается на цокольном

этаже одного из самых больших зданий. Все здания комплекса связаны друг с другом на одном или двух уровнях.

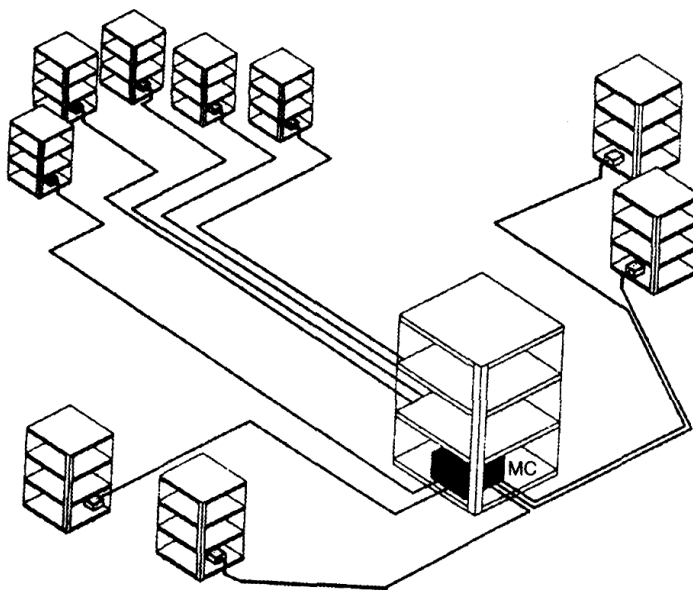


Рис. 15.4. Схема одноуровневого соединения зданий в кампусную сеть. MC - главный кросс (с разрешения компании Corning Cable Systems, см. [15.2], рис. 2.12, с. 2.6.)

На рис. 15.4 показан один из методов одноуровневого объединения зданий в кампусную магистральную сеть. Это одноуровневое объединение не имеет ничего общего с трехуровневой иерархией, которую мы обсуждали выше. Существует также схема объединения зданий на двух уровнях. Она используется в кампусных строениях, занимающих большую площадь, например, для больших военных баз и университетов с площадью в десятки или сотни квадратных миль. В двухуровневой схеме все здания соединяются не напрямую с MC, а через промежуточный кросс (IC). Эта двухуровневая схема, используемая в больших сетях, часто обеспечивает более эффективное использование электронного оборудования, такого как мультиплексоры, маршрутизаторы, коммутаторы, с точки зрения емкости сети и возможностей волокна или сетевых сегментов.

Можно перечислить несколько преимуществ использования одноуровневого соединения в сеть с топологией звезды:

- обеспечивается единая точка управления для системной администрации;
- можно легко добавлять дополнительные звенья кампусной сети;
- можно гибко изменять сеть;
- обеспечивается легкое обслуживание схем защиты от несанкционированного доступа;
- допускается тестирование и реконфигурация системной топологии и приложений из МС;
- обеспечивается простая изоляция (других звеньев) при централизованном тестировании.

Промежуточный кросс (IC) показан на рис. 15.3. В случае двухуровневого соединения, выбранные IC могут обслуживать ряд зданий. Эти кроссы затем присоединяются к МС.

15.4. Замечания по поводу прокладки волоконно-оптического кабеля

В секции 10.3 стандарта ANSI/TIA/EIA-568-B.1 [15.1] рекомендуется использовать многомодовое волокно 62,5 мкм для горизонтальной прокладки в месте установки оборудования и многомодовое или одномодовое волокно для магистральной прокладки.

В случае многомодового кабеля 62,5 мкм он, как минимум, состоит из двух волокон, помещенных в защитную оболочку. Полоса пропускания такого кабеля 1 ГГц при максимальной длине сегмента 90 м, определенной при обсуждении горизонтальной прокладки. Тип волокна – многомодовое градиентное волокно. Это волокно должно удовлетворять требованиям стандарта ANSI/EIA/TIA-492AAAA [15.3].

Оптическое волокно, применяемое для магистральной проводки, состоит из многомодового или одномодового оптического волокна, объединенных в кабельные группы по 6-12 волокон. Эти группы собираются,

образуя компактный кабель, покрытый защитной внешней оболочкой. Эта оболочка может иметь сложную структуру, состоящую из нескольких слоев, включая ряд диэлектрических слоев и металлический защитный слой.

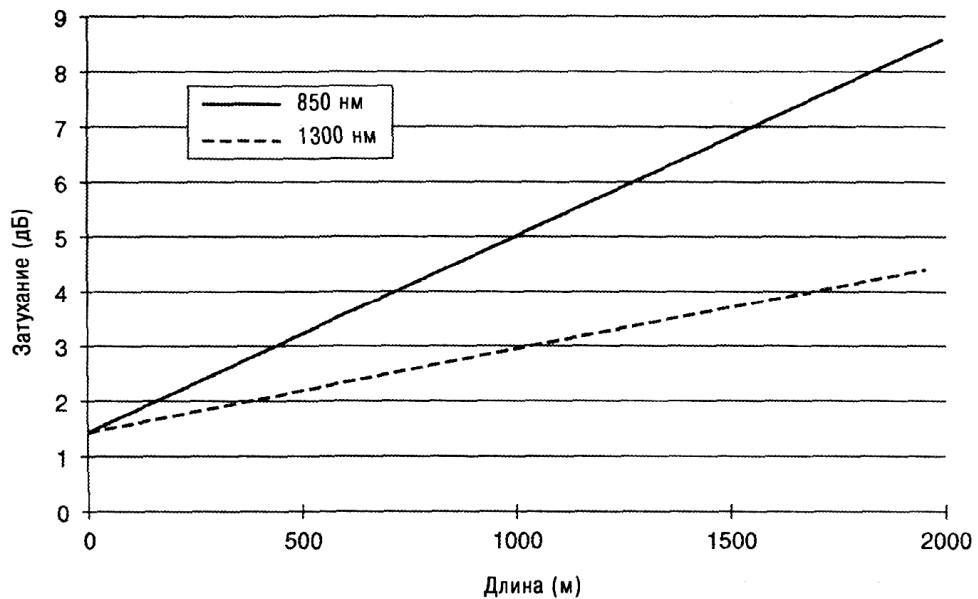


Рис. 15.5. Затухание звена магистральной кабельной прокладки для многомодового кабеля 62,5 и 50 мкм в зависимости от его длины (с разрешения организаций ANSI/EIA/TIA-568-B.1, см. [15.1], рис. 11-6, с. 56)

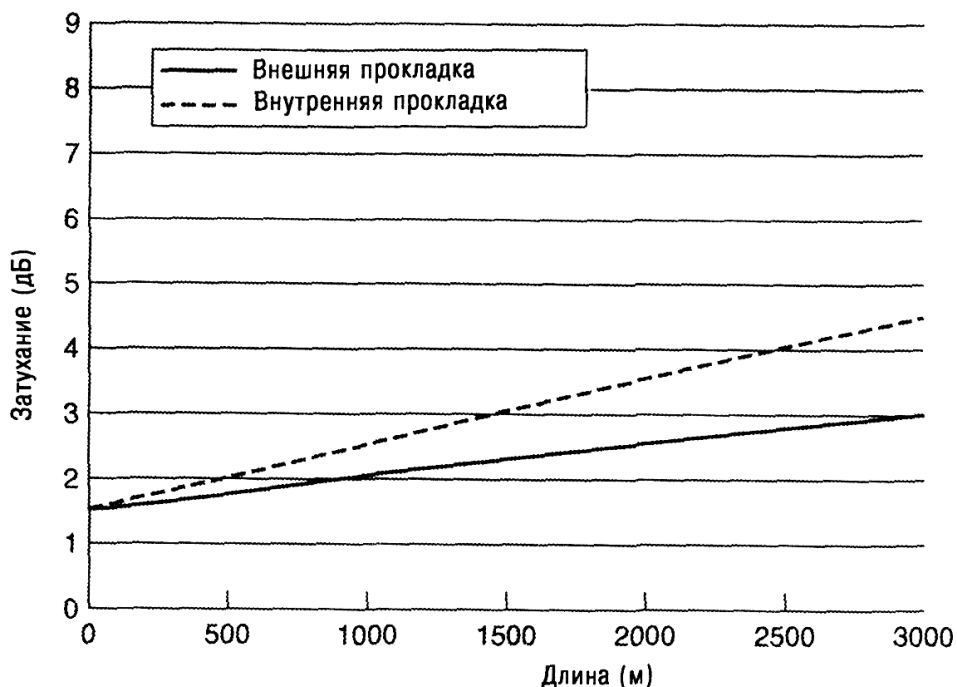


Рис. 15.6. Затухание звена магистральной кабельной прокладки для одномодового кабеля в зависимости от его длины (с разрешения организаций ANSI/EIA/TIA-568-B.1, см. [15.1], рис. 11-7, с. 57)

Затухание такого кабеля показано на рис. 15.5 (многомодовое волокно 62,5 мкм) и рис. 15.6 (одномодовое волокно). Рабочая длина волны для многомодового волокна и источника излучения типа СИД - 1310 нм. Одномодовое волокно здесь также работает на длине волны 1310 нм.

Хотя в стандарте ANSI/EIA/TIA-568-B.1 признается возможность одномодового волокна работать на магистрях, максимальная длина которых может достигать 60 км, это расстояние, в общем случае, рассматривается как некое расширение, выходящее за границы его основных рекомендаций.

Нужно также отметить, что битовая скорость системы зависит не только от волокна, но и от расстояния передачи и характеристик передатчика, прежде всего его центральной длины волны, спектральной ширины и оптического времени нарастания. Следовательно, рис. 15.5 и 15.6 характеризуют зависимости, соответствующие типовым используемым скоростям передачи.

Минимальный радиус изгиба. Одной из важных особенностей при прокладке ВОК является необходимость соблюдения минимальных радиусов изгиба кабеля. Если при прокладке кабель был согнут больше положенного, то результатом может быть увеличение затухания кабельного участка или даже образование трещин в волокне. Если элементы кабеля (буферная трубка или покрытие) не повреждены, затухание должно вернуться в норму, когда согнутый кабель разогнется. Производители кабеля указывают минимальные радиусы изгиба для кабеля при действии натяжения и после прокладки. В табл. 15.1 приведена спецификация типовых значений радиусов изгиба.

Максимальные растягивающие нагрузки. Этот показатель означает, насколько сильно можно тянуть кабель при прокладке, чтобы не повредить (разорвать) волокно. Самая большая вероятность повредить волокно приходится на процесс прокладки. Особо необходимо контролировать натяжение кабеля при использовании механических устройств протяжки кабеля.

При ручной прокладке кабеля такого мониторинга не требуется.

Таблица 15.1

Спецификация типовых радиусов изгиба^{а)}.

| Тип прокладки | Число волокон | Минимальный радиус изгиба | | | |
|-----------------------|---------------|---------------------------|-------|--------------|-------|
| | | Нагруженный | | Разгруженный | |
| | | см | дюймы | см | дюймы |
| Кампусная магистраль | 2-84 | 22,5 | 8,9 | 15,0 | 5,9 |
| | 86-216 | 25 | 9,9 | 20,0 | 7,9 |
| Внутренняя магистраль | 2-12 | 10,5 | 4,1 | 7,0 | 2,8 |
| | 14-24 | 15,9 | 6,3 | 10,6 | 4,2 |
| | 26-48 | 26,7 | 10,5 | 17,8 | 7,0 |
| | 48-72 | 30,4 | 12,0 | 20,3 | 8,0 |
| | 74-216 | 29,4 | 11,6 | 19,6 | 7,7 |
| Горизонтальная | 2 | 6,6 | 2,6 | 4,4 | 1,7 |
| | 4 | 7,2 | 2,8 | 4,8 | 1,9 |

^{а)} Спецификация основана на репрезентативных кабелях. Для конкретных кабелей, соответствующие значения должны быть уточнены у производителя кабеля.

Замечание. Для внутренней горизонтальной прокладки кабеля с 2 и 4 волокнами, например, типа Siesog, радиус изгиба равен 1 дюйму (2,54 см).

Источник. Напечатано с разрешения Corning Cable Systems, см. [15.2], рис. 2.25, с. 2.16

В табл. 15.2 приведена спецификация типовых растягивающих нагрузок.

Таблица 15.2

Спецификация типовых растягивающих нагрузок^{а)}.

| Тип прокладки | Число волокон | Максимальная растягивающая нагрузка | | | |
|--------------------------|---------------|-------------------------------------|-------|--------------|-------|
| | | Кратковременная | | Долгосрочная | |
| | | Н | фунты | Н | фунты |
| Кампусная магистраль | 2-84 | 2700 | 608 | 600 | 135 |
| | 86-216 | 2700 | 608 | 600 | 135 |
| Внутренняя магистраль | 2-12 | 1800 | 404 | 600 | 135 |
| | 14-24 | 2700 | 608 | 1000 | 225 |
| | 26-48 | 5000 | 1124 | 2500 | 562 |
| | 48-72 | 5500 | 1236 | 3000 | 674 |
| | 74-216 | 2700 | 600 | 600 | 135 |
| Горизонтальная прокладка | 2 | 750 | 169 | 200 | 45 |
| | 4 | 1100 | 247 | 440 | 99 |

а) Спецификация основана на репрезентативных кабелях. Для конкретных кабелей, соответствующие значения должны быть уточнены у производителя кабеля.

Источник. Напечатано с разрешения Corning Cable Systems, см. [15.2], рис. 2.26, с. 2.17.

15.4.1. Оптические разъемы, рекомендуемые для использования при прокладке волоконно-оптического кабеля в здании

Оптический разъем типа 568SC рекомендуется стандартом ANSI/TIA/EIA-568-B.1 [15.1] для использования при прокладке оптоволоконна в здании, благодаря его возможности устанавливать и поддерживать точную «поляриность» передающего и приемного оптических волокон в двух ВОСП, и, в то же время, работать с системами передачи, использующими другое число оптических волокон. Независимо от того, какой разъем используется на кабельной стороне коммутационной панели или телекоммуникационной розетки, два симплексных разъема SC или один 568SC и коммутационный шнур панели будут использовать двухволоконный разъем 568SC. В качестве адаптера для 568SC можно использовать либо два симплексных SC адаптера, либо один дуплексный SC адаптер в одном корпусе.

Характеристики передачи оптического разъема. Вносимые потери разъема 568SC будут не больше 0,75 дБ, тогда общее ослабление кабеля через кросс от любого терминированного оптического волокна до любого другого терминированного оптического волокна не превысит 1,5 дБ. Возвратные потери такого разъема будут больше или равны 26 дБ. Вносимые потери сращения оптического волокна будут не больше 0,3 дБ.

К коммутационной панели для ВОК подключаются следующие аппаратные устройства:

- а) основной кросс (МС);
- б) промежуточный кросс (IC);
- в) горизонтальный кросс (НС);

- г) точки перехода горизонтальной кабельной системы;
- д) телекоммуникационные розетки/разъемы.

Типичные кроссовые устройства состоят из кроссовых перемычек или коммутационных шнуров и коммутационных панелей, соединенных с горизонтальной или магистральной оптической кабельной системой.

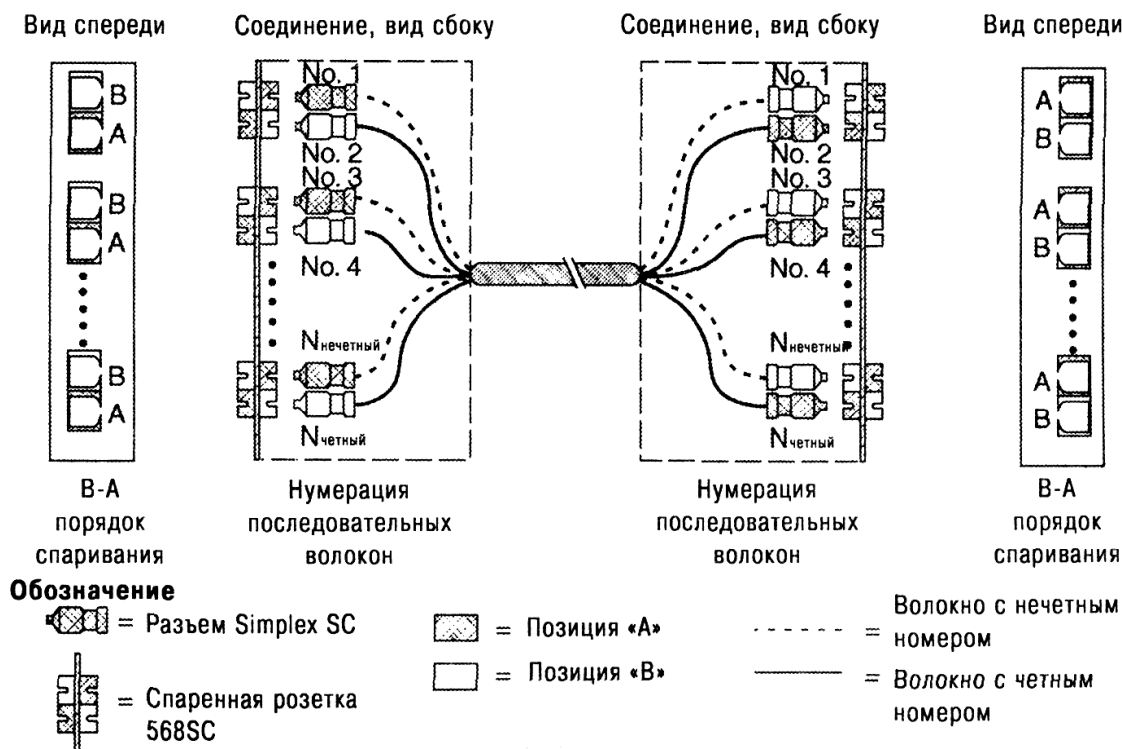
15.4.2. Практика кабельной прокладки — учет полярности

Чтобы быть уверенным в том, что соединение с использованием 568SC поддерживает точную «полярность» по всей кабельной системе (имеется в виду сохранение полярности в гибридной (электрической и оптической) кабельной системе, учитывая, что оптический сигнал имеет одну полярность, это слово взято нами в кавычки), необходимо обеспечить точную ориентацию адаптера и оптической кабельной проводки. После завершения прокладки кабеля проверяется точность «полярности», чтобы убедиться, что оптическая кабельная система будет поддерживать эту «полярность» передающего и приемного волокон, и не создаст проблем конечным пользователям.

Прокладка осуществляется так, что магистральная и горизонтальная кабельные системы устанавливаются путем спаривания волокон с нечетными номерами со следующими за ними волокнами с четными номерами (т.е., волокно 1 со 2, 3 с 4 и т. д.), для того чтобы сформировать двухволоконный маршрут передачи. Каждый кабельный сегмент в месте прокладки устанавливается с парной перекрестной (кроссовой) ориентацией, такой, что нечетные волокна соответствуют позиции А на одном конце и позиции Б на другом конце, а четные волокна - позиции Б на одном конце и позиции А на другом конце.

Перекрестная ориентация достигается путем использования последовательной нумерации волокон (т.е., 1, 2, 3...) на обоих концах оптоволоконной линии, но адаптеры 568SC на каждом конце устанавливаются в противоположном порядке (т.е., А-В, А-В ... - на одном конце и В-А, В-А ...

— на другом конце). На рис. 15.7 показана разводка оптического волокна с соблюдением нужной «полярности».



Замечание: Затенение сделано только для ясности

Рис. 15.7. Прокладка оптического кабеля с соблюдением надлежащей «полярности» (показано оборудование стенных шкафов). (С разрешения организации ANSI, см. TIA/EIA-568-B.1, [15.1], рис. 10-1, с.36)

На рис. 15.8 показан план прокладки волокна на территории заказчика. На нем также показаны правила нужной ориентации адаптеров 568SC в точках MC, IC и HC, а также в точках выхода телекоммуникационных розеток/разъемов, для того чтобы быть уверенным, что надлежащая «полярность» волоконно-оптической системы поддерживается от основного кросса до телекоммуникационной розетки/разъема. Волоконно-оптические линии, не показанные на этом рисунке, гарантированно должны быть соединены так, что адаптер 568SC, установленный на одном конце с ориентацией А-В, будет установлен на другой стороне с ориентацией В-А.

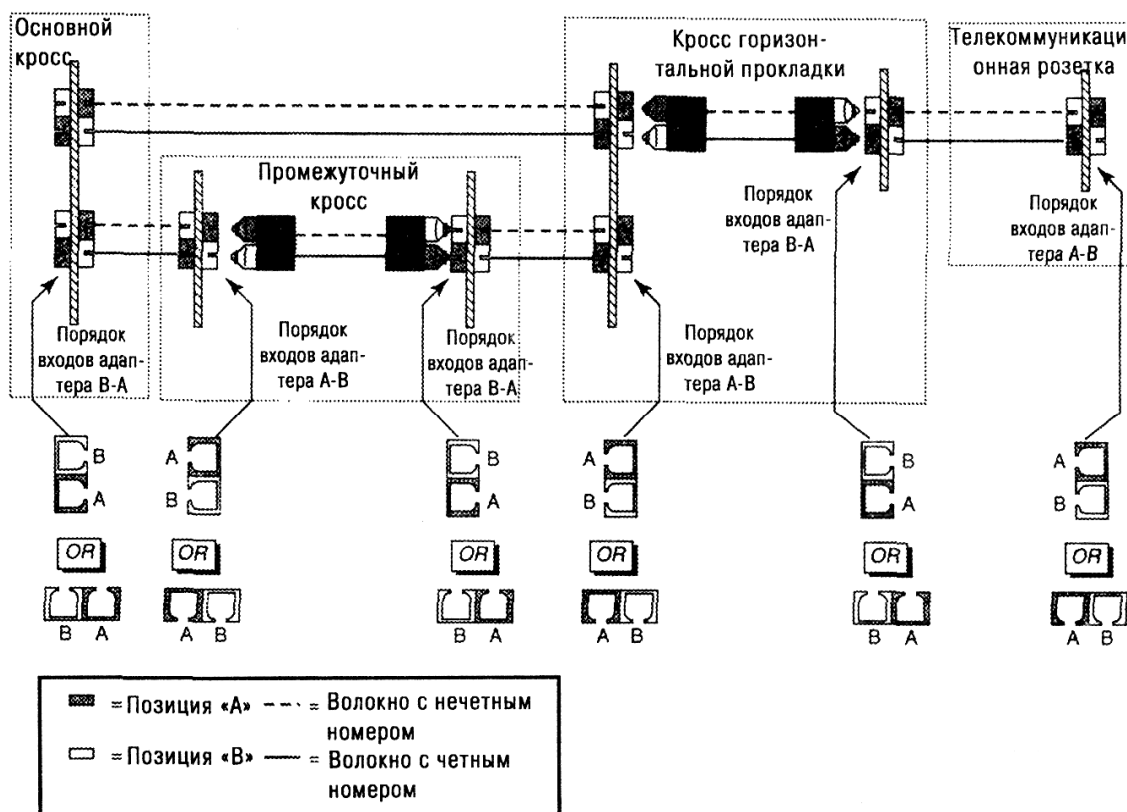


Рис. 15.8. План прокладки оптического кабеля в здании. (С разрешения организации ANSI, см. TIA/EIA-568-B.1, [15.1], рис. 10-2, с.37)

15.5. Выбор кабеля и его использование

Как говорилось выше, существует два типа оптического волокна, которые могут быть использованы для прокладки в помещении заказчика. Это многомодовое волокно 62,5 мкм, которое лучше всего подходит для прокладки коротких сегментов в помещении заказчика, и одномодовое волокно, используемое для сегментов большей длины в пределах кампусной сети и для установки в очень высоких зданиях.

Причиной привлекательности многомодовых кабелей является возможность использовать относительно недорогие передатчики типа СИД и VCSEL (см. гл. 4) и дешевые оптические разъемы. СИД и, в меньшей степени, VCSEL передатчики имеют достаточно широкий спектр излучения.

Таблица 15.3

Сводные данные приложений, использующих многомодовое (62,5 мкм)

ВОЛОКНО

| Приложения | Скорость (Мбит/с) | Комбинация среда передачи-технологии | | | | | |
|----------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| | | Горизонтальные кабели (< 100 м) | | Кабели в здании (< 300 м) | | Внешние магистрали (< 2000 м) | |
| | | Среда | Техника Тх (нм) | Среда | Техника Тх | Среда | Техника Тх |
| 10BASE-F | 20 | MM | S, 850, LED, LD | MM | S, 850, LED, LD | MM | S, 850, LED, LD |
| Token Ring | 32 | MM | S, 850, LED, LD | MM | S, 850, LED, LD | MM | S, 850, LED, LD |
| 100VG-AnyLAN | 120 | MM | S, 850, LED, LD | MM | S, 850, LED, LD | MM | LE, 1300, LED |
| 100BASE-F | 125 | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | LE, 1300, LED |
| FDDI | 125 | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | LE, 1300, LED |
| 1000BASE-F | 1250 | MM | SL/LE, 850/1300 | MM | SL/LE, 850/1300 | SM | LL, 1300, LD |
| Fiber channel SONET-ATM | 133 | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | <u>S</u> , 850, LED, LD | MM | <u>LE</u> , 1300, LED |
| | 266 | MM | SL/LE, 850/1300 | MM | SL/LE, 850/1300 | SM | LL, 1300, LD |
| | 531 | MM | SL/ <u>LE</u> , 850/1300 | MM | SL/ <u>LE</u> , 850/1300 | SM | LL, 1300, LD |
| | 1062 | MM | SL, 850, LD | MM | SL, 850, LD | SM | LL, 1300, LD |
| | 52 | <u>MM</u> | <u>S</u> , 850, LED, LD | <u>MM</u> | <u>S</u> , 850, LED, LD | <u>MM</u> | <u>LE</u> , 1300, LED |
| | 155 | MM | <u>S</u> /LE, 850/1300 | MM | <u>S</u> /LE, 850/1300 | MM | <u>SL</u> /LE, 850/1300, LED, LD |
| | 622 | MM | SL/LE, 850/1300 | MM | SL/LE, 850/1300 | SM | LL, 1300, LD |
| | 1244 | MM | <u>SL</u> , 850, LD | MM | <u>SL</u> , 850, LD | SM | LL, 1300, LD |
| 2488 | <u>MM</u> | <u>SL</u> , 850, LD | MM | <u>SL</u> , 850, LD | SM | LL, 1300, LD | |

MM — 62,5 мкм волокно с полосой 160/500 МГц·км

SM — стандартное одномодовое волокно

S - коротковолновое (850 нм), LED или эквивалентный LD

SL — коротковолновое (850 нм), LD

LE - длинноволновое (1300 нм), LED

LL — длинноволновое (1300 нм), LD

Замечание. Жирным шрифтом с подчеркиванием выделены те случаи, где необходимы модификации существующих стандартов, для поддержки большинства экономически эффективных подходов.

Источник. Напечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, см. [15.2], рис.3.4, с. 3.6.

VCSEL также имеет относительно круглый луч излучаемого света, который лучше стыкуется с круглым входным конусом волокна. Многомодовые волокна имеют большую входную апертуру, позволяющую пропустить в волокно больше света, чем в случае одномодового волокна. В таблицах 15.3 и 15.4 приведены сводные данные для многомодового (62,5 мкм) и одномодового волокон соответственно.

Компания Corning Cable Systems и организация ANSI в стандарте [15.1] рекомендовали использовать гибридные кабели, состоящие как из одномодовых, так и многомодовых волокон, при кабельной прокладке кампусных сетей. Они позволяют использовать дешевые источники излучения и детекторы в сетях с длиной сегмента не более 2000 м и скоростью передачи вплоть до 155 Мбит/с. Для скоростей 622 Мбит/с и выше используется одномодовое волокно на расстояниях до 40 км.

Такие волоконно-оптические системы работают на длинах волн 850 и 1300 нм. Поведение светового сигнала на этих длинах волн различно. Затухание на длине волны 850 нм выше, чем на длине волны 1300 нм. Полоса частот на 850 нм существенно уже. Многомодовое волокно имеет лучшие показатели на длине волны 1300 нм, что делает возможность использовать большие длины сегментов. Однако, если полоса частот и длина сегмента не являются определяющими, то нужно иметь в виду, что системы на длине волны 850 нм в общем случае дешевле, чем на 1300 нм.

Сводные данные приложений, использующих одномодовое волокно

| Приложение/ спецификация | Максимальное расстояние, м | Скорость, Мбит/с | Затухание, дБ/км | Длина волны, нм |
|---|----------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| Прокладка кабеля по ANSI/TIA/ EIA-568-B.1 | 60000 ^{а)} | - | 0,5/0,5 ^{б)} | 1310/1550 |
| Гигабитный Ethernet ^{в)} | 3000 | 1000 | 0,5 | 1310 |
| FDDI-SMF | 60000 | 100 | 0,5 ^{г)} | 1300 |
| Fiber channel (ОВ канал) | 10000 | 531 ^{д)} | 0,5 | 1300 |
| Fiber channel (ОВ канал) | 10000 | 1063 ^{д)} | 0,5 | 1300 |
| ATM/SONET | 55000 | 155 | нет данных | 1300 |
| ATM/SONET | 50000 | 622 | нет данных | 1300 |

^{а)} За пределами стандарта ANSI/TIA/EIA-568-B.1.

^{б)} Максимальное затухание для оптического кабеля для внешней прокладки, то же для внутренней прокладки 1,0/1,0 дБ/км для 1310/1550 нм.

^{в)} Значения для спецификации 1000BASE-LX, спецификация 1000BASE-SX не поддерживает одномодовое волокно.

^{г)} Типовые значения. (Затухание из конца в конец до 32 дБ).

^{д)} Мбод.

Источник. Напечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, см. [15.2], рис.3.5, с. 3.7.

Требуемое число волокон. Большинство приложений, связанных с прокладкой кабеля в помещении заказчика, требуют полнодуплексной работы; следовательно, как минимум требуется два волокна. Нужно заметить, что видео приложения могут работать по симплексной схеме и, следовательно, требуют только одного волокна. Однако, кабельное ТВ быстро меняется от того традиционного варианта, которое требовало одно волокно, и уже требует двух волокон, учитывая те достижения, которые возможны сегодня.

Традиционная телеметрия требует только одного волокна. Но и здесь ситуация меняется. Некоторые виды телеметрии интерактивны и требуют двух волокон для приема и передачи.

Передача данных использует два волокна. Тем не менее используются и четырехволоконные системы. Определяющим фактором является тип сетевого приложения, который реализуется. В табл. 15.5 перечислены наиболее современные сетевые приложения и требуемое число волокон для их реализации.

Таблица 15.5

Сетевые приложения и число требуемых волокон

| Сетевое приложение | Требуемое число волокон | Тип волокна |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| ATM | 2 | SM, MM ^{б)} |
| 10BASE-F (Ethernet) | 2 | MM |
| 100BASE-F (Ethernet) | 2 | MM |
| 1000BASE-F (Ethernet) | 2 | SM, MM |
| Token Ring | 4 | MM |
| FDDI | 4 (DAS), 2 (SAS) | MM |
| Fiber channel | 2 | MM |
| SONET/SDH ^{а)} | 4 | SM |
| Голос (в обе стороны) | 2 | MM |
| Видео (трансляция) | 1 или 2 | SM, MM |
| Видео (наблюдение) | 1 | MM |
| Видео (интерактивное) | 2 | MM |
| Телеметрия | 1 или 2 | MM |

^{а)} SONET/SDH и видео перечислены здесь благодаря требованию проектировщиков систем внедрить эти приложения в существующие сети связи

^{б)} SM - одномодовое волокно, MM - многомодовое волокно, 62,5 мкм
Замечание. DAS — станция с двойным подключением, SAS — станция с одинарным подключением (термины FDDI).

Источник. Напечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, см. [15.2], рис. 4.4, с. 4.3.

Дополнительное электронное оборудование стоит за каждым требованием увеличения числа волокон. Электронное оборудование, такое как мосты и маршрутизаторы, может быть использовано для сбора и распределения сигналов. Более того, число волокон может быть увеличено, а количество оборудования уменьшится. Существует интересный набор

альтернатив, доступных проектировщику. Существует огромное количество сервисов данных, которые могут (или не могут) включать голос. Например, в ATM предполагается передавать по одной и той же сети голос, данные и видео. Существует форма FDDI, которая также позволяет передавать голос. Некоторые разновидности Ethernet позволяют передавать голос.

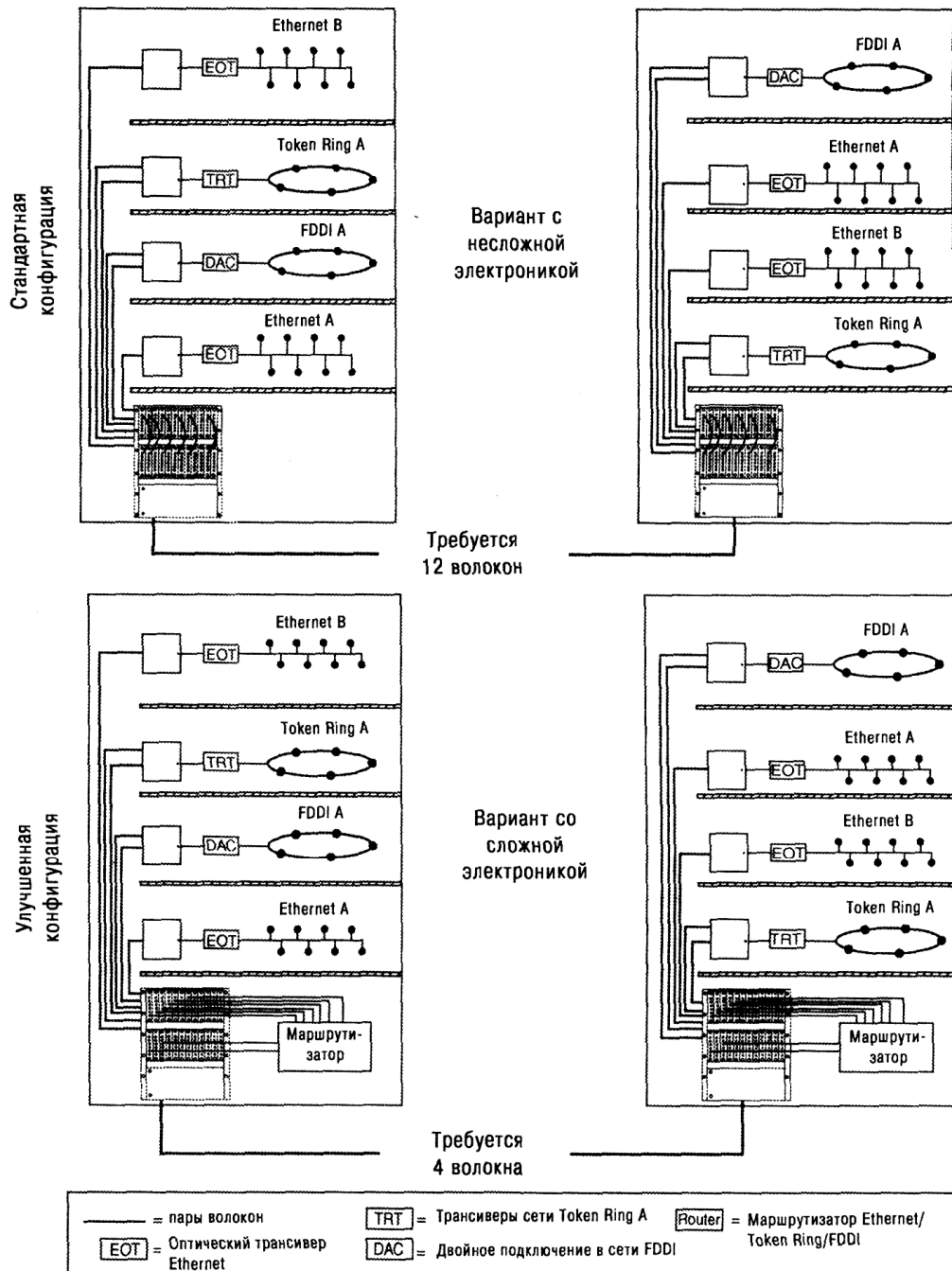


Рис. 15.9. Увеличение числа волокон как альтернатива увеличению количества оборудования. (Напечатано с разрешения компании Corning Cable Systems, см. [15.2], рис. 4.5, с. 4.5.)

Проектировщик должен решить, использовать ли дополнительное электронное оборудование и уменьшить число волокон, или минимизировать электронное оборудование и использовать больше волокон в кабеле. На рис. 15.9 показаны две обобщенные схемы передачи данных между двумя зданиями. При стандартной конфигурации требуется 12 волокон между зданиями. В улучшенном варианте, используя то же оборудование, но добавив маршрутизатор, можно использовать только 4 волокна для осуществления тех же операций.

Сложность сетевого оборудования также может играть здесь свою роль. В результате, пользователь может сделать вывод, что более простая сеть, использующая больше волокон и меньше электроники, является наиболее экономически эффективной.

Резервные волокна. Проектировщик сети уже на ранней стадии должен решить вопрос об использовании резервных волокон. Он может сделать это и определить нужное число резервных волокон путем анализа возможного роста сети в будущем. Он (анализ) должен опираться на знание новых систем, которые будут установлены, или которые планируется построить. Если ожидаются небольшие изменения на ближайшие пять лет, то нужно зарезервировать, по крайней мере, 25% волокна от того уровня, который требуется сейчас. 50% увеличение рекомендуется в случае, если будущие сетевые приложения определены и потенциальные запросы на будущий сервис велики. Если же будущее расширение можно предвидеть, а расширение в будущем само по себе будет провести крайне трудно, то можно рекомендовать сразу закладывать 100% резерв волокна по отношению к текущим требованиям. Кроме того, проектировщик должен сразу выбирать число волокон в кабеле из какого-то стандартного ряда, где число волокон кратно 6 или 12 в зависимости от типа и назначения кабеля.

Типичная сеть состоит из концентратора (хаба), находящегося в каждой аппаратной и позволяющего минимизировать требования на число волокон во внутренней магистрали здания. Проектировщик должен

определить уровень использования мостов и маршрутизаторов, что поможет установить число волокон, требуемых в магистрали здания. Таблицы, аналогичные табл. 15.5, должны быть составлены, чтобы можно было быть уверенным, что все требования будут выполнены. В качестве совета можно предложить использовать для прокладки 30-волоконный многомодовый (62,5 мкм) кабель до каждого горизонтального кросса, если продумывается вариант установки волокна до каждого рабочего стола. 30-волоконный кабель кажется избыточным, если не принимать во внимание будущие расширения. Включение одномодового волокна не рекомендуется. В целом все волокно в здании должно быть многомодовым (главным образом, ввиду достигаемой экономии), до тех пор пока какие-то особые обстоятельства не продиктуют необходимость использования одномодового волокна. Однако многомодовое волокно может поддерживать скорости выше 1 Гбит/с при передаче на короткие расстояния, например, меньше 300 м. Для внутренней магистрали в здании нужно использовать как минимум 24-волоконный кабель, для поддержки распределенной электроники.

Прокладка центральной магистрали. Так как волоконная оптика обычно не требует использования высокоскоростных модемов на основе медных пар, то оптоволоконные системы не требуют использования электроники в аппаратных на каждом этаже, и поэтому допускают полностью централизованную кабельную сеть. В методике, основанной на документе TIA TSB72 [15.5], описано, в общем случае, где конечный пользователь может разместить всю электронику в одной аппаратной в здании. Сравните это с использованием многих аппаратных, распределенных по зданию, в случае, если среда передачи - медный кабель. Это значительно упрощает управление и обслуживание оптоволоконных сетей и обеспечивает более эффективное использование портов электрических концентраторов, маршрутизаторов и коммутаторов.

Реализовать такой проект можно несколькими путями. Во-первых, можно протянуть кабели от розеток (или многопользовательских розеток) к

одной центральной аппаратной в здании. Во-вторых, можно разместить неразъемное соединение горизонтального кабеля с внутренним магистральным кабелем в той же аппаратной. В третьих, можно использовать пассивное соединение в каждой аппаратной. Каждое из этих решений имеет какие-то достоинства, однако пользователи, обычно, склоняются ко второй альтернативе. Причина такого предпочтения в том, что это позволяет упростить размещение кабеля и предлагает определенную степень гибкости при добавлении новых пользователей.

Рекомендуется при прокладке магистрального кабеля в здании, оставлять достаточное количество резерва по длине, чтобы обеспечить возможные расширения. Что касается числа волокон в магистральном ВОК здания, то оно должно выбираться так, чтобы иметь возможность использования настоящих и будущих приложений с учетом максимально допустимой плотности подключений, обслуживаемых конкретным телекоммуникационным шкафом.

Компания Corning Cable Systems предлагает, в своей работе Design Guide [15.2], использовать два волокна для каждого приложения, доставленного до рабочего пространства, так что помещение, обслуживающее 72 пользователей, потребует прокладки кабеля со 144 волокнами. Дополнительно могут быть приложения, такие как голос и SCADA, или телеметрия, которые будут обслуживаться электроникой в аппаратной, требуя дополнительно 12 или больше волокон. Рекомендуется также, как минимум двухволоконный (62,5 мкм) кабель для передачи данных и отдельно кабель UTP категории 3 для телефонии.

15.6. Тестирование эксплуатационных характеристик корпоративной сети

Эксплуатационные характеристики/показатели сети необходимо

измерять. Это трудно, но это необходимо. Простой путь — внять тому, что сказал об этом производитель в спецификации, в журнальной статье или сообщил устно. Многие сети передачи данных установлены и эксплуатируются без приемо-сдаточных испытаний. Перерывы в работе, непредвиденные узкие места и производительность сети ниже стандартной, после сдачи ее пользователю в эксплуатацию, может вызвать стресс у сетевых менеджеров и будет стоить приличных денег для устранения возникших проблем.

15.6.1. К вопросу о показателях корпоративной сети

Рассмотрим шесть показателей корпоративной сети:

1. *Пропускная способность.* Сеть должна точно доставлять пакеты данных на узлы всех пользователей с надлежащей скоростью и с оговоренным уровнем ошибок.

2. *Время ожидания.* Важно знать время доставки, т.е. сколько времени нужно, чтобы доставить пакеты данных (или фреймы) от пункта отправления до пункта назначения. Некоторые типы трафика требуют более срочной доставки, чем другие.

3. *Дрожание фазы (джиттер).* Изменение фазы последовательного потока бит по отношению к эталонной/опорной фазе (взято из работы [15.8]).

4. *Целостность.* Данные не должны быть искажены в процессе прохождения по сети.

5. *Порядок доставки.* В некоторых системах передачи данных порядок доставки пакета или фрейма должен поддерживаться на пути от источника до назначения.

6. *Приоритет.* Если происходит перегрузка на сети (которая ведет к затору), система может отбрасывать некоторые пакеты или фреймы (чтобы разобрать затор). Сеть должна быть способна различить пакеты с различным приоритетом и отбрасывать пакеты (фреймы) с низким приоритетом (как это делают АТМ и Frame Relay).

План тестирования сети должен рассмотреть эти шесть показателей при составлении методологии тестирования для верификации показателей сети и выявления источников ошибок. Последнее является важным требованием, так как тестирующий персонал должен быть в состоянии определить в чем проблема, вызвавшая ухудшение производительности сети или ее сбой.

15.6.2. Подготовка плана и методология тестирования

Мы должны быть в состоянии определить соответствие каждого из шести приведенных показателей требованиям спецификации на систему/сеть. В словаре [15.8], как пример, используется термин *«пропускная способность»*. Существует большое количество определений этого показателя. Например, в RFC 2544 [15.9] этот показатель определяется как *«способность оборудования обрабатывать или передавать данные в течение определенного периода времени»*. Другое определение этого термина: *«справка, подтверждающая отсутствие ошибок в фреймах в течение единичного интервала времени»*. Применительно к устройству группа IETF дает такое определение этого термина: *«максимальная скорость, при которой не один из предложенных фреймов не был отброшен данным устройством»*.

Один из подходов установить соответствие требованиям по пропускной способности заключается в том, чтобы увеличивать скорость потока фреймов на входе устройства до тех пор, пока оно не начнет сброс фреймов. Об этом легче сказать, чем сделать на корпоративной сети, которая работает с минимальным набором тестового оборудования и специализированных тестовых позиций на самом приборе. Даже для того, чтобы измерить скорость фреймов, требуется специальное тестовое оборудование.

Конечно, для того чтобы определить осуществил ли сетевой элемент сброс фрейма, тестер должен был бы использовать мост или терминировать выходные порты элемента и считать каждый пакет или фрейм, прошедший

на вход устройства. Как мы сказали, это большая работа. Например, каждый тестовый пакет (или фрейм) должен быть идентифицирован, так чтобы приемный порт смог изолировать его и сосчитать. Даже если используемая ОС достаточно современна и быстра, она не может генерировать и нумеровать тестовые пакеты на оптической сети, работающей с гигабитными скоростями.

Устройство тестирования корпоративной сети должно иметь специализированное аппаратное обеспечение со следующими характеристиками:

- возможностью устанавливать BER тест для скоростей до 1 Гбит/с.

Проектная цель: 10 Гбит/с, BER < 1×10^{-12} , Agilent 81250 [15.10].

- возможностью тестировать маршрутизаторы, Agilent E5203A (тестер маршрутизаторов) [15.10].

- возможностью моделировать протоколы, устройство должно включать все протоколы, используемые в корпоративной сети.

- возможностью генерировать форматы кадров Ethernet, ячеек ATM, кадров FDDI, кадров Frame Relay уровня 2 и тестировать состояние фреймов на уровне 3 (если нужно, то и фирменный генератор фреймов). Это может быть Agilent 86100A [15.10].

- возможностью измерять джиттер и время ожидания. Можно использовать Agilent p/o 5980-0990E [15.10].

- тестовое оборудование и техника измерений рассмотрена в гл. 16.

Следует заметить, что может быть некоторое дублирование тестовых процедур, выполняемых оборудованием, указанном в списке выше.

В работе [15.7] описывается тест пропускной способности, приведенный в документе IETF RFC 2544 [15.9], для определения максимальной пропускной способности сетевого элемента.

Большинство производителей оборудования проводят тест, описанный в [15.7]. Проектировщики сетей также должны быть озабочены разными мелочами, которые могут оказаться важными, когда дело касается таких тонких моментов. Например, маршрутизатор на одном конце линии связи T1

запоминает кадры, которые подаются на его вход со скоростью порядка 1 Гбит/с. Сам он может передавать кадры со скоростью 1,536 Мбит/с. Ясно, что буфер маршрутизатора будет заполнен в конце теста. Однако маршрутизатор не остановится, а будет какое-то время продолжать выдавать тестовые кадры с выхода. В таких случаях алгоритм тестирования должен быть модифицирован так, чтобы кадры, которые пересчитываются, инкапсулировались в кадры, которые не пересчитываются. Конечно, было бы проще использовать тестовое оборудование, работающее на скорости 1 Гбит/с.

Словарь [15.8] описывает измерение времени ожидания, как процедуру, имеющую особенность, которая может усложнить ее выполнение. Для устройств, осуществляющих пересылку бит, время ожидания описывается, как «временной интервал, начинающийся тогда, когда конец первого бита входного кадра достигнет входного порта, и заканчивающийся тогда, когда первый бит выходного кадра показывается на выходном порту». Здесь время ожидания определяется по отношению к сетевому элементу. Снова следуем методике, предложенной в RFC 2544 [15.9]. Сначала определяем максимальную пропускную способность сетевого элемента, затем передаем непрерывный поток кадров со скоростью, равной пропускной способности, в течение 120 с, из которых 60 с используется для передачи кадра с «подписью». Кадр с подписью несет временную отметку, и время ожидания определяется с помощью этой переданной временной отметки. Рекомендуется использовать несколько прогонов и определять окончательный результат средним значением полученных результатов. В работе [15.7] сообщается, что такой подход работает хорошо, если тестирующий прибор формирует единственное число, которое и является чем-то, определяющим возможность сетевого элемента пересылать кадры.

ГЛАВА 16 СРЕДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТИ СЕТИ

16.1. Сценарий

Допустим, что в нашем распоряжении есть сеть ВОСП, которая имеет большой процент отказов и не удовлетворяет требованиям BER, или вообще не работает, или мы хотим подтвердить показатели ошибок, перед тем как сдать ее в эксплуатацию.

В нашем распоряжении четыре средства, используемые для поиска неисправностей. Первым из них является *центр управления сетевыми операциями* (NOCC), который может обеспечить проведение теста без перерыва обслуживания (см. разд. 12.6). Остальные средства (второй-четвертый) могут обеспечить проведение тестов только с *перерывом обслуживания*, что означает необходимость перерыва в обслуживании коммерческого трафика во время проведения активного тестирования.

В этой главе мы обсудим важный прибор, *измеритель мощности*, который относится ко второй группе средств для проведения тестов. К третьей группе средств для проведения тестов относится *оптический рефлектометр во временной области* (OTDR), который позволяет измерять многие важные параметры ВОЛС, и, обычно, используется для определения местоположения обрыва волокна или разрыва непрерывности показателей затухания кабеля. Четвертая группа средств служит для проведения BER-тестов отдельных сегментов или системы в целом. Мы также кратко рассмотрим *оптические спектроанализаторы* (OSA). В конце раздела кратко обсуждается возможность использования оптического супервизорного канала, организуемого в агрегатном канале WDM.

16.2. Оборудование для тестирования

Технические специалисты, проводящие тестирование, должны иметь возможность использовать измерительное оборудование, перечисленное в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Список тестового оборудования

| Оборудование | Цель использования |
|--------------------------------|---|
| Цифровой вольтметр | Отслеживание рабочих уровней напряжения |
| Оптический спектроанализатор | Измерение несущих и формы спектра |
| Оптический измеритель мощности | Измерение оптической мощности на выходе передатчика, входе приемника и в промежуточных точках |
| Среднеквадратический вольтметр | Измерение отношения сигнал/шум |
| Функциональный генератор NTSC | Измерение параметров ТВ-сигналов |
| Видеомонитор | Измерение параметров видеоизображения |
| OTDR (оптический рефлектометр) | Идентификация разрыва волокон и мест разрыва, измерение затухания, возвратных потерь оптических разъемов и сростков |
| BERT (BER тестер) | Тестирование уровня BER, локализация отказов |
| Вектроскоп | Измерение дифференциальной фазы и усиления ТВ сигналов |
| Источник светового сигнала | Организация оптических измерений, включая измерение мощности |

16.3. Процедуры тестирования, использующие измерители оптической мощности

16.3.1. Измерение обрывов оптоволоконна в ВОК, используя измерители оптической мощности

Обрыв жилы в ВОК происходит достаточно часто при установке ВОЛС. Симптомы этого события достаточно просты: нет сигнала на приемном конце кабеля. При поиске неисправности при этом задаются вопросом — что случилось, каковы возможные варианты? Ответов может быть несколько:

- нет светового сигнала на выходе передатчика;
- возник разрыв волокна, питающего удаленный приемник;
- приемник не работает.

Процесс тестирования, с целью установить обрыв волокна, очень похож на тестирование прохождения электрического сигнала, для тех, кто с этим сталкивался. Оно осуществляется с помощью вольтметра. На ВОЛС технические специалисты используют лампу вспышку или другие простые источники света, для того чтобы проверить, проходит ли свет через волокно на удаленный конец или нет. Предпочтительно использовать красный свет.

Если этот тест проводится с измерителем мощности, мы можем сказать сколько света прошло через волокно на удаленный его конец. Аналогично тесту с лампой вспышкой, нам нужен источник света. Идеально, нужно иметь калиброванный источник света с определенной длиной волны. Желательно использовать следующие длины волн: 850, 1300 или 1310, или 1550 нм. Дополнительно, было бы желательно использовать длины волн 780 и 1630 нм. Организация такого простого теста показана на рис. 16.1.

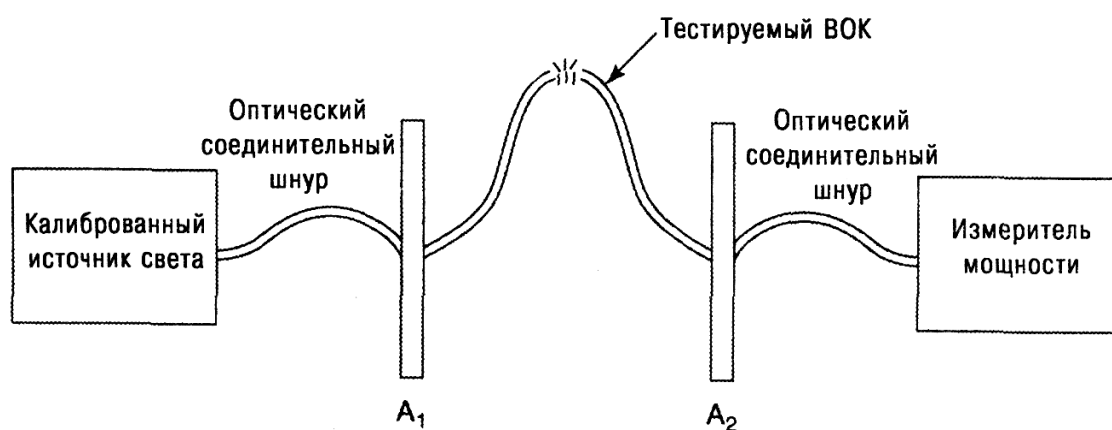


Рис. 16.1. Схема организации тестирования с измерителем мощности. A_1 и A_2 — оптические кроссовые панели.

В этом случае мы отсоединяем передатчик от кабеля и присоединяем его выход к измерителю мощности. Если показания в норме, то свет излучается передатчиком нормально и выход передатчика удовлетворяет спецификации (лежит в поле допуска). Двигаемся дальше до точки доступа,

ближайшей к выходному порту кабеля, и снова измеряем уровень оптической мощности. Показания измерителя мощности обычно считываются в дБм. Мы заметили, что последний измеренный уровень на 0,7 дБ ниже показаний на выходе передатчика. Исходя из расчета бюджета мощности, это соответствует ожидаемым потерям между выходом передатчика и точкой доступа (на кроссе или оптической кроссовой панели). Двигаясь дальше, соединяем измеритель мощности с точкой выхода оптического разъема приемника на удаленном конце. Убеждаемся, что сигнала нет. С большой долей вероятности делаем вывод, что налицо разрыв волокна в кабеле, где-то между передатчиком и оптическим разъемом приемника. Возникает вопрос: где произошел этот обрыв?

Если есть точки доступа к волокну, то аналогичный тест можно было бы провести последовательно приближаясь к точке, где есть световой сигнал. Снова нужно провести подсчеты, ориентируясь на схему расчета бюджета мощности и потери в элементах, расположенных до точки обнаружения сигнала. Разница между замеренным и рассчитанным должна лежать в пределах +5%. Двигаясь вдоль волокна и продолжая измерения последовательно во всех точках доступа, мы достигнем точки, где сигнал отсутствует. Теперь мы можем приблизительно оценить, где произошел обрыв.

Следуя этой методике и не проводя больше тестов, нам нужно вытянуть всю секцию кабеля и полностью заменить ее. Можно сэкономить много средств на резервных кабелях, если использовать OTDR, который позволит определить точку обрыва с точностью в несколько десятков сантиметров. Используя последующие тесты, мы определяем более точно точку обрыва, вытягиваем часть кабеля и свариваем.

16.4. Введение в оптическую рефлектометрию во временной области (OTDR)

В разделе 16.3 мы были, так сказать, в подвешенном состоянии. Мы знали, что в волокне есть разрыв, но не знали, где точно он возник. Используя OTDR, мы сможем точно установить, где произошел обрыв.

OTDR дает пользователю визуальное представление о характеристиках оптического волокна по его длине. Он представляет график на экране, где горизонтальная ось соответствует расстоянию по длине кабеля, а вертикальная ось - затуханию кабеля. При соответствующей настройке, дисплей OTDR может обеспечить пользователя такой информацией:

- местоположением аномалий (вдоль волокна);
- потерями в волокне;
- потерями на срезке и потерями в разъеме;
- оптическими возвратными потерями.

Он обеспечивает самое полное представление о целостности волокна (кабеля).

Работа OTDR напоминает работу радара. Он посылает короткие световые импульсы и измеряет время, требуемое для получения отраженного сигнала. В случае радара, это может быть импульс, отраженный от корабля или самолета. В нашем случае OTDR излучает световой импульс, который распространяется вдоль волокна до тех пор, пока не встретит какое-то препятствие. Возвращенный сигнал состоит из обратно рассеянного света вдоль волокна (а) и света, отраженного от *дефектов* волокна, таких как разрывность показателя преломления на стыках секций, разрывы волокна и концы волокна. Оптические потери между двумя точками на волокне могут быть, косвенно, определены путем измерения разницы в мощности оптического сигнала, отраженного от этих двух точек. Типичная картина отраженного сигнала показана на рис. 16.2.

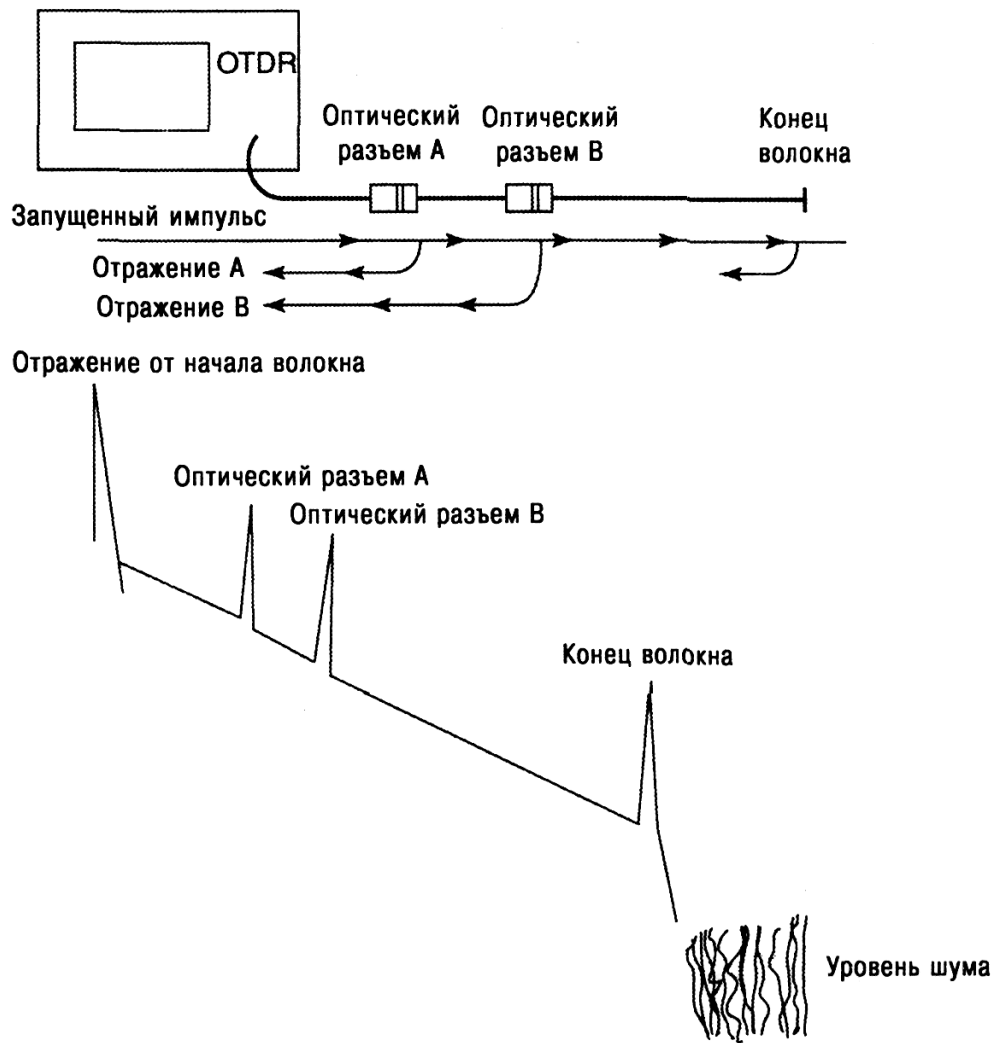


Рис. 16.2. Типовая схема использования OTDR для измерения на образце волокна с двумя концевыми оптическими разъемами. Верхняя часть рисунка показывает схему подключения OTDR, а нижняя — график затухания отраженного сигнала, воспроизведенного на экране OTDR.

Основная задача OTDR - измерять расстояние до мест обрыва волокна или других аномалий по длине кабеля. Зная показатель преломления сердцевины волокна (n) и время, требуемое для возврата отражения (T), в секундах, OTDR вычисляет расстояние D до дефекта, в метрах, используя следующее выражение:

$$D \text{ (метры)} = 3 \times 10^8 \times (T) / 2 \times (n) \quad (16.1)$$

Часто отраженный световой сигнал очень слаб и маскируется шумом приемной части OTDR. Вот почему OTDR посылает пачку импульсов. При-

емник в этой ситуации принимает пачку импульсов, вычисляет для нее среднее значение, после чего отображает след на экране дисплея. График такого следа показан на рис. 16.2.

OTDR представляет результаты своих измерений в форме следа (графика) затухания на дисплее. Отображенная информация представлена наклонными следами логарифма рассеянной мощности, принятой OTDR. Следует заметить, что наклон следа примерно равен затуханию волокна. Там, где есть сродки, разъемы или другие разрывы непрерывности волокна, их приблизительные потери можно оценить по величине вертикального смещения наклонных следов по разные стороны от стыка или разрыва непрерывности. Более аккуратные значения измерений указанных потерь можно получить, используя среднее двух измерений OTDR, проведенных с разных концов измеряемой линии. Можно убедиться, что OTDR является уникальным инструментом, позволяющим проводить измерения дефектов волокна, как в плане вносимых ими изменений оптической мощности, так и с точки зрения их расстояния до OTDR. На рис. 16.3 представлен вид графика отражений сигнала на дисплее OTDR. Идентифицируются разрывы непрерывности затухания.

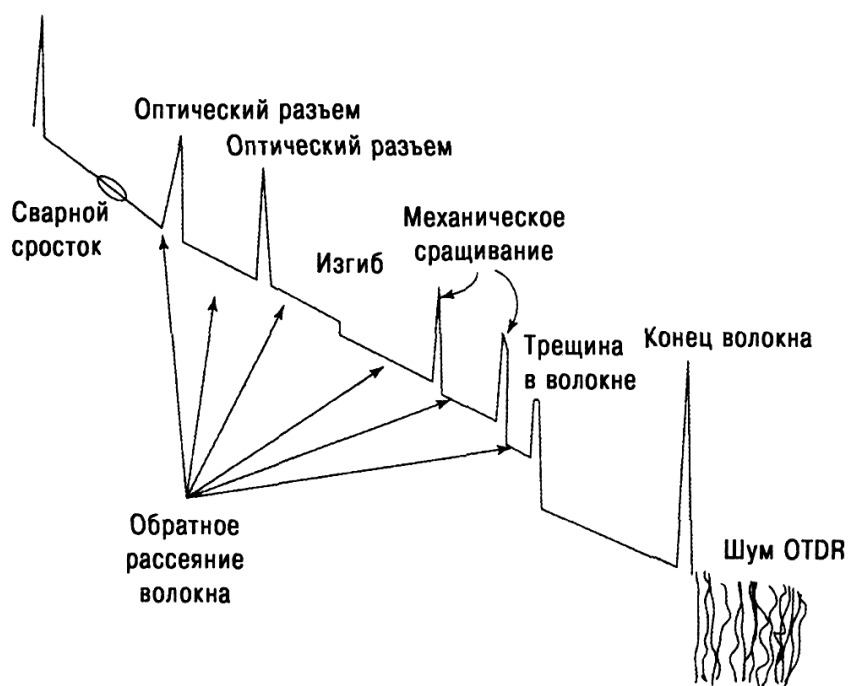


Рис. 16.3. Вид графика отражений сигнала на дисплее OTDR.

В целом по длине, волокно, отражающее свет, оставляет впечатление среды с откликом в виде прямой линии с постоянным наклоном. Постоянный наклон представляет аккумулярованное затухание волокна при прохождении по нему импульсов. Прямая линия представляет обратное рассеяние, характеризующее рассеяние от неоднородностей волокна. Вдоль следа наблюдаются ступеньки. *Ступенька* - это мгновенное изменение мощности. Большинство, если не почти все, из этих ступенек, видимые вдоль следа OTDR, представляют сварные сrostки. Ступенька также может быть результатом света, отраженного от микроизгиба волокна. В этой ситуации волокно может быть расплющено или строго согнуто (макроизгиб), так что какое-то количество света может быть потеряно, что приводит к потерям (затуханию).

На следе OTDR также видны пики, или острые выступы. Они представляют собой отражения, вызванные переходами через границу раздела сред: стекло-воздух, воздух-стекло. Можно ожидать появление таких пиков в местах механических сrostков или оптических разъемов. На конце волокна происходит возвращение света из шума. Этот шум в большинстве своем возникает благодаря приемнику, который имеет конечную чувствительность. Важным параметром OTDR является динамический диапазон. Он может быть определен, как разница между мощностью в начале обратного рассеяния, показанного в виде пика в начале следа, и мощностью у пика в самом конце следа (волокна), у границы шума.

Существует еще один предел на дисплее OTDR. Это так называемая мертвая зона ослабления, или просто *мертвая зона*. Этот предел описывает расстояние между началом пика и точкой, где он почти вернулся к уровню обратного рассеяния. Мертвая зона ограничивает разрешающую способность измерений. Оба эти параметра зависят от поведения приемника и от импульса, запущенного вдоль волокна при измерении. Они как будто гасят друг друга: чем лучше динамический диапазон, тем хуже мертвая зона, и наоборот.

Существуют четыре типа измерительного оборудования в рамках семейства OTDR:

1. Полнопрофильные OTDR;
2. Мини-OTDR;
3. Устройства поиска мест обрыва волокна;
4. Блоки удаленного тестирования.

Полнопрофильные OTDR являются обычными оптическими рефлектометрами во временной области, имеющими множество реализованных функций-особенностей. Они обычно имеют большой вес и меньше приспособлены для транспортировки, чем мини-OTDR или устройства поиска мест обрыва волокна. Их используют обычно в лаборатории или для сложных процедур поиска неисправностей в полевых условиях.

Мини-OTDR и устройства поиска мест обрыва волокна являются портативными устройствами, широко используемыми для поиска неисправностей в ВОЛС. Мини-OTDR (в силу специфики) имеют уменьшенное число реализованных функций-особенностей. Они дешевле и легче и меньше по размерам, но при этом позволяют выполнять все основные функции полнопрофильных устройств. Что касается устройств поиска мест обрыва волокна, то это ни что иное, как оптоэлектронная измерительная лента, которая может мерить расстояние до катастрофических дефектов волокна.

Полнопрофильные OTDR должны иметь возможность работать со следующими длинами волн: 850 и 1300 нм (многомодовое волокно), 1310 и 1550 нм (одномодовое волокно).

Можно ожидать, что OTDR обеспечит получение следующей информации о типичной ВОЛС или ее сегменте:

- типовые характеристики волокна (коэффициент затухания, коэффициент обратного рассеяния и др.);
- вносимые потери;
- отражательную способность;

- возвратные потери;
- расстояние между дефектами;
- расстояние и потери между терминальными точками.

Следующие два типа аномалий могут быть показаны на экране дисплея OTDR:

Ложный сигнал. Многие наблюдали такого типа сигналы (напр., двоение изображения) на экране ТВ. На экране дисплея может появиться ложный сигнал, которого фактически нет в наличии. Появление такого сигнала может быть вызвано как OTDR, так и волокном. Ложный сигнал может быть вызван многократными отражениями в обоих направлениях в волокне. Свет одного из таких отражений, попадая в OTDR с определенной задержкой, может вызвать появление ложного сигнала, рассматриваемого как дополнительный дефект. Интенсивность ложного сигнала можно снизить путем уменьшения отражательной способности оптических разъемов, или путем замены разъемов сварными сращениями. Типичный пик от ложного сигнала показан на рис. 16.4.

Можно также иметь ложные сигналы, если OTDR не настроен корректно. Если импульс 1 от OTDR еще распространяется по волокну, а импульс 2 запущен раньше того момента, когда импульс 1 покинул волокно, может появиться дополнительный (ложный) сигнал. Это происходит от того, что приемник OTDR видит эхо как от одного, так и от другого импульсов в одно и то же время и дополнительный импульс может появиться там, где его не ждут. Это можно устранить увеличением времени между запуском импульсов. Некоторые OTDR делают это автоматически.

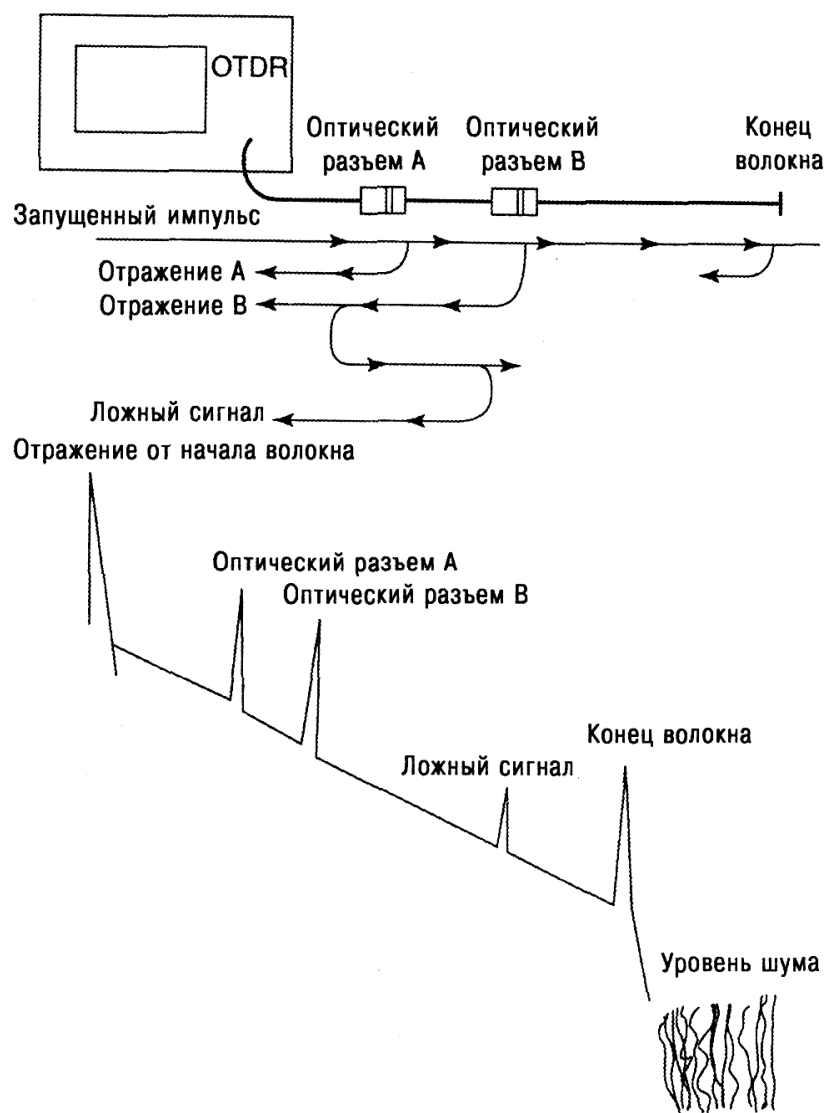


Рис. 16.4. Типичный пик от ложного сигнала

Эффект усиления. Этот эффект - еще один источник ошибок при использовании OTDR. Когда два различных типа волокна соединяются с помощью срутка или разъема, может возникнуть эффект усиления. Он появляется в точке стыка/сварки и наблюдается в виде возрастания амплитуды, а не спада, как должно быть. Этот эффект неприятен для персонала, занятого поиском неисправностей, так как им нужно мерить возникающие потери количественно. Два стыкуемых волокна имеют, вероятно, различные свойства. В результате, одно из волокон в стыке посылает обратно более сильное отраженное излучение, чем другое, приводя к ошибкам в измерении потерь.

Рис. 16.5 иллюстрирует эффект усиления на OTDR.

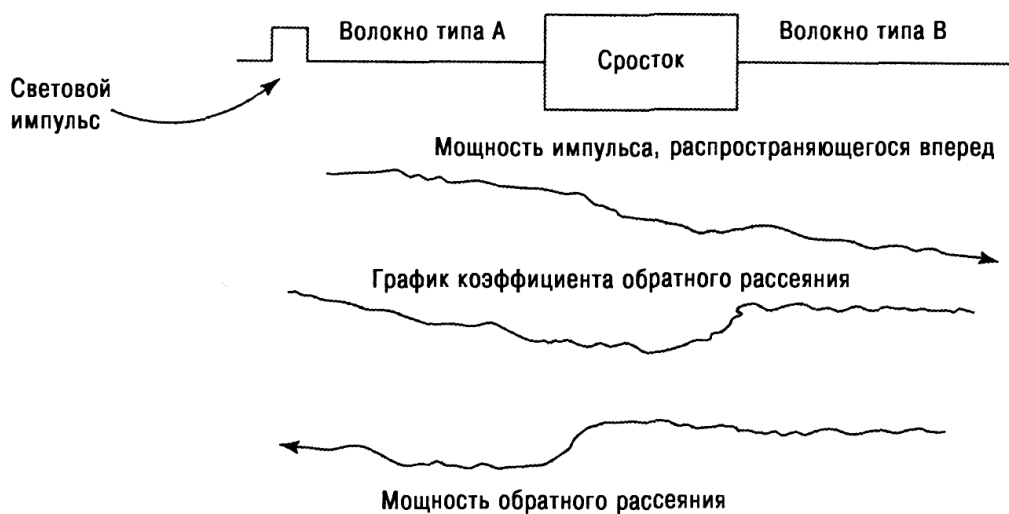


Рис. 16.5. Графики на дисплее OTDR, показывающие появление эффекта усиления. Стык, как видно на графике, усиливает свет. Вот почему этот эффект называется эффектом усиления.

Диапазон использования OTDR. Диапазон использования OTDR имеет максимум, который определяется динамическим диапазоном инструмента. Предположим, что производитель определил, что динамический диапазон (D) OTDR составляет 30 дБ на длине волны 1550 нм и что затухание волокна на этой длине волны $[L_{(дБ/км)}] = 0,25$ дБ/км, включая все сростки и разъемы. Каков при этом будет максимальный диапазон использования этого инструмента?

$$\begin{aligned} \text{Диапазон использования (км)} &= D_{(OTDR)(дБ)} / L_{(дБ/км)} = \\ &= 30 \text{ дБ} / 0,25 \text{ дБ/км} = 120 \text{ км} \end{aligned} \quad (16.2)$$

Чтобы преодолеть проблемы, связанные с мертвой зоной, рекомендуется проводить двусторонние измерения. С одного конца волокна технические специалисты будут измерять потери для идентификации дефектных точек и составление записей показаний. С противоположного конца того же волокна они будут измерять потери для тех же дефектных точек и делать аналогичные записи измерений. Следующий шаг — суммировать эти два показания для каждой точки и вычислить среднее

значение, которое более точно, чем одно из них.

Нужно быть аккуратным, когда в сооружениях используется волокно в свободной буферной трубке. В этом случае, длина волокна больше длины кабеля, что сказывается на точности измерений кабеля с помощью OTDR. Избыточная длина волокна в кабеле определяется не только за счет легкой пучковой укладки волокна внутри трубки, но и спиральной укладкой трубок вокруг центрального силового элемента. Производитель кабеля должен указать в спецификации это избыточное количество волокна в кабеле в виде процента от общей длины кабеля, измеренной по внешней оболочке. Показания OTDR должны быть отъюстированы по этому показателю.

Производитель оборудования должен также привести в спецификации показатель преломления волокна с точностью до четырех знаков. Прежде чем проводить какие-то измерения с помощью OTDR, его нужно настроить, введя это точное значение показателя преломления.

Ниже показан метод коррекции кабельной длины по избыточной длине волокна.

В выражении (16.3) приведено соотношение между длиной кабеля D_{cable} и длиной волокна D_{fiber} , полученной с помощью OTDR.

$$D_{\text{cable}} = D_{\text{fiber}} / (1 + \alpha/100) \quad (16.3)$$

где α = избыточное количество волокна в кабеле в процентах, указанное производителем кабеля.

Рассмотрим пример. Обслуживающий персонал определил показание расстояния до обрыва волокна по OTDR - 48,36 км. Производитель кабеля указал в спецификации процент избыточного волокна в кабеле - 5,4%. Для того чтобы определить истинное расстояние до точки обрыва волокна, персонал должен вычислить длину кабеля, измеренную по внешней оболочке. Применяя формулу (16.3), получаем [16.1, 16.2]:

$$D_{\text{cable}} = 48,36 / (1 + 0,054) = 45,88 \text{ км.}$$

1 6.5. Тестирование BER и другие процедуры тестирования ошибок

16.5.1. Понятие BERT

В цифровых сетях одним из наиболее важных параметров качества обслуживания (QoS) является BER. Если не рассматривать системы КТВ, то можно сказать, что ВОЛС передают исключительно цифровой трафик. Единственная возможность измерить BER - использовать электрический эквивалент светового сигнала. Поэтому, первым шагом в осуществлении тестирования BER является формирование электрического эквивалента светового сигнала путем использования детектора света в приемнике.

Сначала мы рассмотрим BER-тест без использования светового оборудования. Представим себе воображаемый тест, осуществляемый на части цифровой сети. Электрический сигнал может иметь форму сигнала сети SONET/ SDH или PDH (см. гл. 9). В этом случае лучше использовать поток DS1 (E1), так как в качестве этого потока может быть взят сервисный поток, этот же тип потока генерируется и BER-тестерами - 1536 (2048) кбит/с. В общем случае для теста используется *псевдослучайная двоичная последовательность* (PRBS). Если мы разорвем участок тестируемой сети и выведем некую последовательность бит, то она будет выглядеть как случайная последовательность. Можно показать, что использование случайного потока бит является наиболее надежным методом тестирования BER.

При тестировании на удаленном конце с использованием DS1 выхода мультиплексора можно применить петлю. Ее организация состоит в том, что мы берем демультиплексированный поток бит с выходного порта канала DS1 и подаем его во входной порт канала DS1 мультиплексора, передающего поток в обратном направлении. Эта процедура показана на рис. 16.6.

Канал приема, при использовании мультиплексора на ближнем конце линии, должен принять двоичный поток, на котором осуществляется замер BER. Словом «должен» мы подчеркиваем тот факт, что на линии при тести-

вание BER и вам требуется уровень BER порядка 10^{-15} , спросите себя: «Сколько я должен ждать (исходя из статистики) до момента появления первой ошибки?» Допустим, что скорость на линии 1 Мбит/с и требуемый уровень BER – 10^{-12} . Тогда ответ в секундах будет: $(1/\text{BER})/\text{Bit rate [с]}$ или $10^{12}/10^6 = 10^6$ с. Это соответствует 277 часам ($10^6/60/60=277$) или 11,57 дням. Это слишком долго и дорого. В этом смысле показатель 10^{-15} кажется избыточным, однако в кругу специалистов разговоры идут именно вокруг этой цифры. (В действительности для измерения BER обычно используется псевдослучайный сигнал со скоростью 2,048 Мбит/с, что в этом случае дает 5,657 дня. Для тестирования цифровых систем стандартами ITU-T предусмотрены интервалы: 12 часов, 1 сутки и 7 суток. Последняя цифра вполне покрывает полученное значение. Для оборудования (напр., SDH) со скоростями 10 Гбит/с, которое уже используется сегодня, BER устанавливается также на уровне не лучше 10^{-12} . (Прим. ред.)).

После консультации с бюджетом мощности ответственный инженер должен спросить: «Сколько дБ бюджетного запаса нужно истратить, чтобы достичь такого BER?» В случае, если линия несет несколько световых каналов (WDM), каждый канал должен измеряться идентично. При этом разница в уровне каналов не должна быть больше 2 дБ.

При тестировании BER могут устанавливаться и другие петли. Нужно помнить, что BERT — это электрический тест, и нам нужно использовать детектор света, чтобы перевести сигнал из оптической в электрическую область. Другие процедуры позволяют использовать собственный приемник линии. Это обязательно нужно для контроля окончательного значения BER линии.

Один из результатов наших рассуждений в том, что при небольшой изобретательности тестирование с установкой петли является прекрасным инструментом для исключения сбоев, имеющих место в оптоволоконных системах [16.3].

16.6. Оптические спектроанализаторы (OSA)

Оптический спектроанализатор отображает спектр оптического сигнала или сигналов. Его дисплей калибруется в дБм вдоль оси y (вертикальная ось) и в нанометрах (для отображения длины волны) по оси x (горизонтальная ось). OSA — один из наиболее широко используемых приборов для отладки систем WDM. Это единственный прибор для измерения отношения оптического сигнала к шуму (OSNR), особенно когда имеешь дело с DWDM. Измерения с использованием OSA могут включать, кроме OSNR, измерение мощности сигнала, уровней мощности отдельных длин волн в случае формирования WDM, ширины спектральной линии светового сигнала, длин волн и шага частотной сетки.

Используя OSA достаточно просто получить величину OSNR. Это отношение (или разность, когда величины используются в логарифмической форме (дБм)) между амплитудным значением мощности сигнала в канале и мощностью шума в полосе канала. Многие измерители мощности дают отношение сигнал/шум автоматически. В системах DWDM приемлемым, обычно, является среднее значение OSNR на уровне 18 дБ [16.4].

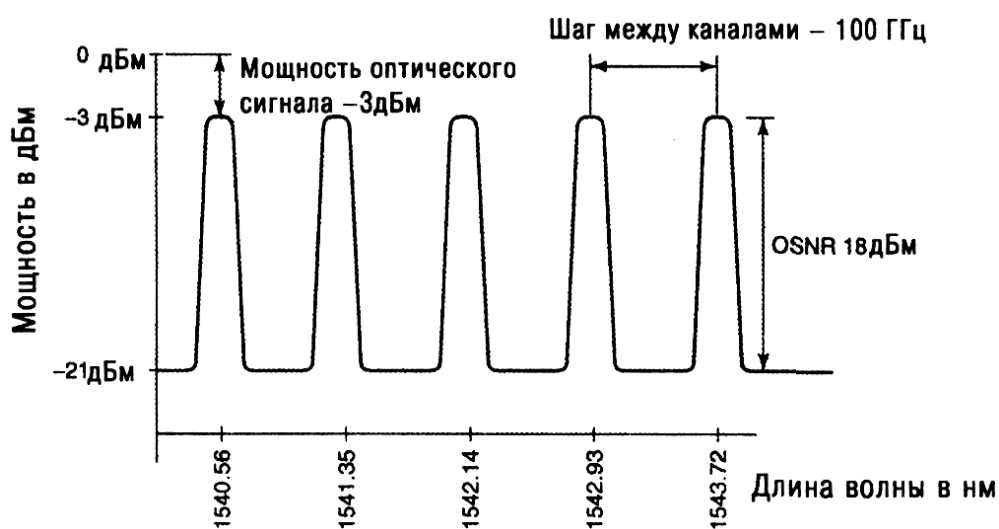


Рис. 16.7. Вид нескольких каналов WDM на экране OSA.

Выравненность уровня мощности передатчика в системах WDM является еще одним интересным параметром. Она обычно приводится как разность между уровнями мощности самого сильного и самого слабого каналов и не должна превышать 2 дБ. На рис. 16.7 показан вид экрана OSA, отображающий несколько сигналов WDM.

Прибор OSA, в комбинации с измерителем мощности и настраиваемым лазерным источником (TLS), может быть использован для измерения усиления ОУ типа EDFA (см. гл. 7).

Оптические анализаторы спектра могут быть разделены на три категории: первая — основана на дифракционных решетках, две других — на оптических интерферометрах, это анализаторы спектров на основе интерферометров Фабри-Перо и Майкельсона. Анализаторы спектра на основе дифракционных решеток способны измерять спектры лазеров и СИД. Разрешающая способность этих приборов, как правило, лежит в диапазоне 0,1-5/10 нм. OSA на основе интерферометра Фабри-Перо имеет фиксированную разрешающую способность по частоте порядка 100 МГц и 10 ГГц. Эта высокая разрешающая способность позволяет использовать их для анализа лазерного чирпа, но она ограничивает диапазон их измерений значительно больше, чем у OSA, основанных на дифракционных решетках. OSA на основе интерферометров Майкельсона используются для непосредственных измерений спектра дисплея, путем вычисления Фурье-преобразования измеренной интерференционной картины [16.2, 16.6].

16.7. Анализаторы световых сигналов

Анализаторы светового сигнала помогают пользователям измерять важные характеристики ВОСП, такие как амплитуда сигнала, полоса модуляции, искажения сигнала, шум и эффекты, связанные с отражением света. Если измерения проводятся с использованием оптического

интерферометра, анализатор светового сигнала позволяет также измерять ширину полосы излучения, чирп и ЧМ-модуляцию одночастотных лазеров.

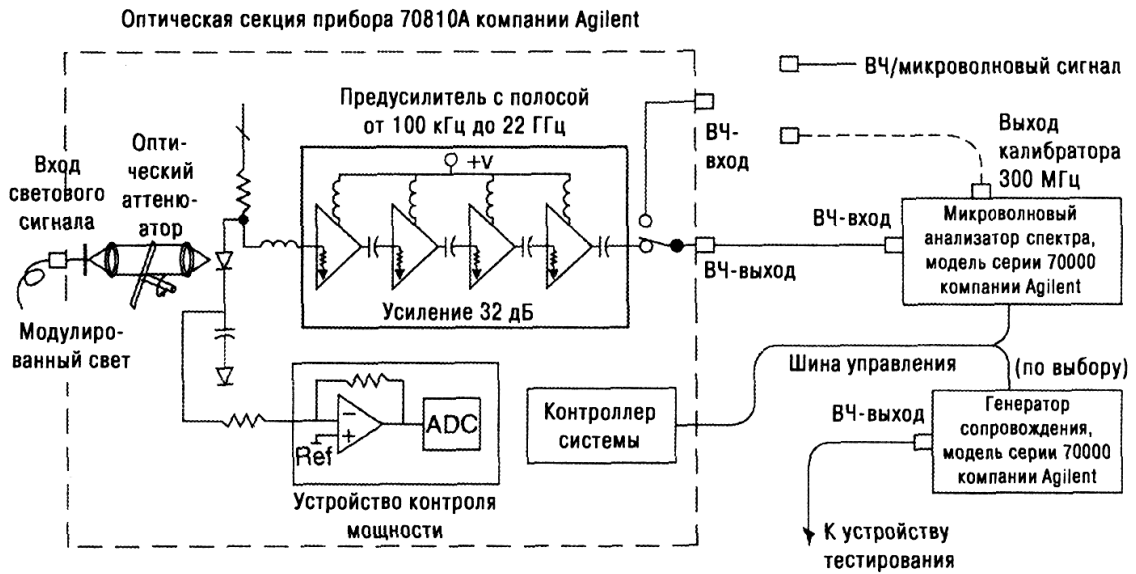


Рис. 16.8. Система анализа светового сигнала. (См. источник [16.5], рис. П., с. 18)

На рис. 16.8 приведена блок-схема анализатора светового сигнала модели 70810А компании Agilent. Он состоит из фотоприемного модуля, а также других встраиваемых модулей измерительной системы серии Agilent 70000.

Модулированный свет поступает в оптическую секцию приемника через одномодовое волокно и оптический разъем на передней панели. Затем сигнал коллимируется и фокусируется на PIN-фотодетекторе. Коллимированный луч проходит через оптический аттенюатор, который управляется с шагом в 1 дБ в диапазоне 30 дБ. Аттенюатор может быть использован для снижения перегрузки на входе.

Приемник генерирует DC- и AC-фототок. DC-фототок направляется в схему устройства контроля мощности. Эта схема измеряет интегрированную или среднюю оптическую мощность. AC-фототок направляется в схему предусилителя с полосой 100 кГц-22 ГГц и входным импедансом 50 Ом. Предусилитель имеет коэффициент усиления 32 дБ, что позволяет улучшить

чувствительность анализатора. В процессе производства измеряется объединенная частотная характеристика фотодетектора, предусилителя и спектроанализатора.

Калибровка и корреляционные данные о сотнях точек частотных выборок в диапазоне 100 кГц-22 ГГц хранятся в анализаторе и используются для коррекции измерений. Используя их, контроллер системы корректирует каждое измерение модулированного светового сигнала для всех частот в полосе 100 кГц-22 МГц, прежде чем отобразить информацию на дисплее.

Спектроанализатор имеет также *трекинг-генератор*. Он может быть использован для создания источника модуляции с разверткой, частота которого синхронизируется с разверткой спектроанализатора. С помощью этого генератора, систему можно использовать для проведения измерений частотной характеристики источников света и детекторов.

Анализатор светового сигнала в оптическом режиме дает возможность пользователю измерять следующие параметры:

- оптическую или выделенную детектором электрическую среднюю мощность;
- модулированную оптическую или выделенную детектором электрическую мощность;
- относительный уровень мощности (P_{MOD}/P_{AVG});
- интенсивность оптического или выделенного детектором электрического шума;
- входную мощность эквивалентного шума (NEP) измерительного устройства;
- относительную интенсивность шума, или RIN, независимо от выбора режима работы;
- оптическую или электрическую ширину полосы в дБ.

16.8. Оптические каналы супервизорного контроля

Оптический канал супервизорного контроля (OSC) является выделенным каналом, используемым для обнаружения отказов или любых существенных изменений в системе. На обычных ВОЛС большинство важных тестов осуществляется с перерывом доставляющего сервис трафика. Канал OSC передает соответствующие тесты и сигналы управления непрерывно. Нужно обеспечить непрерывность работы канала OSC на линии или сети, так как эти каналы несут управляющую информацию. По этой причине для канала OSC обычно назначается отдельная длина волны, не зависящая от агрегатных каналов DWDM.

Канал OSC не используется для рутинного тестирования системных элементов или для отправки оперативных сообщений. Концепция канала состоит в том, чтобы постоянно мониторить систему и иметь представление о текущем поведении системы. Надежно функционирующий канал OSC является обязательным и жизненно важным для контроллера системы и системы управления NOCC, позволяющим гарантировать качество передачи в сети и наиболее эффективное использование сетевых ресурсов. Если канал OSC обнаружит сбой или серьезное изменение в уровне производительности, он информирует об этом систему управления NOCC.

Благодаря важности непрерывного обслуживания канала OSC, его длина волны обычно выбирается за пределами полосы пропускания ОУ типа EDFA, либо слева (1525 нм), либо справа (1610 нм) от этой полосы. Эти две длины волны лежат за пределами окна прозрачности 1550 нм, но в то же время достаточно близко, чтобы отслеживать те же явления, которые способствуют появлению отказов. Устройства и оборудование мониторинга канала OSC, как правило, поставляется производителями, что накладывает определенную специфику. Это относится и к различным служебным каналам, используемым для технического обслуживания.

Другая идея состоит в том, чтобы использовать конфигурацию каналов

STS-1 SONET (или STM-1 SDH) для обеспечения служебной телефонной связи вдоль всей линии. По крайней мере канал 64 кбит/с должен быть доступен системе диспетчерского/супервизорного управления и сбора данных (SCADA). Доступ из этой системы к каждому сетевому элементу (NE) очень полезен для технических специалистов, так как позволяет осуществлять мониторинг системы до уровня отдельных карт. Канал 64 кбит/с мог бы быть доступен для организации непрерывного тестирования BER каждой линии, образуя еще один канал для тестирования системного BER. Это было бы хорошим дополнением возможностям внутреннего мониторинга, заложенным в технологии SONET/SDH.

ГЛАВА 17 ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

17.1. Введение

Как и везде, в сетях связи существует спрос и предложение. Спрос на емкость каналов, а в терминологии IT-специалистов — на полосу пропускания. Спрос примерно удваивается за год. (Во введении автор говорил об удвоении за три года, прогнозы и оценки мы оставляем за кадром. (*Прим. ред.*)). Указанная емкость (полоса) должна быть доставлена потребителям и одобрена ими.

Единственное транспортное средство, способное доставить эту огромную емкость — ВОЛС. В каждом узле оптической сети поток бит должен конвертироваться в электрическую область для осуществления коммутации и маршрутизации. Отсюда ясна цель — создание полностью оптической сети, где в электрическом виде сигнал должен существовать только в точках ввода/вывода.

Оптические линии связи в настоящее время работают с потоками 10 Гбит/с на несущую. При использовании технологии DWDM одно волокно способно передавать 8, 16, 32, 40, 80, 160, 320 световых несущих. Через несколько лет с момента публикации эти линии будут работать с потоками 40 Гбит/с на несущую. Полагая при этом, что несущая сможет передавать 160 таких каналов, получим емкость одного волокна $6,4 \text{ Тбит/с}$ ($40 \times 160 = 6400 \text{ Гбит/с} = 6,4 \text{ Тбит/с}$).

Наибольший недостаток такой сети сейчас, с точки зрения сетевого оператора, в том, что приходится постоянно осуществлять конвертацию сигнала из оптической в электрическую форму и обратно (ОЕО). Кое-где ситуация улучшилась за счет использования оптических усилителей вместо регенераторов. Однако последние не исчезли. Необходимость их применения можно резко уменьшить, если использовать оптическую коммутацию,

исключающую преобразования ОЕО.

Для оптических сетей общего пользования, использующих технологию SONET/SDH, цена регенерации оптического сигнала очень высока, особенно если при этом требуется использовать полный набор терминального оборудования в каждой регенерационной точке. Но даже в этой относительно однородной сети SONET/SDH управление оптическим уровнем может быть ключевым фактором в поддержании целостности системы.

Даже в тех местах в сети, где полное преобразование ОЕО не требуется, частичное преобразование сигнала в ключевых точках может быть жизненно важно для мониторинга качества сети. В точках, где установлены усилители, наличие активного мониторинга также необходимо. Это требует ответвления оптического сигнала и преобразование (типа ОЕО) только его части.

Движение в сторону использования гигабитного Ethernet (GbE) на сетях MAN и WAN является тем фактором, который, возможно, смягчит давление, оказываемое на сетевых операторов, в пользу применения полностью оптической коммутации, так как стоимость интерфейса GbE для оптической сети (например, WDM) много ниже, чем для сетей SONET/SDH. Нам кажется маловероятным, что GbE вытеснит SONET/SDH в обозримом будущем везде, кроме, некоторых специальных приложений. Однако воздействие факта внедрения GbE на мир связи, вероятно, приведет к увеличению диверсификации трафика, что, в свою очередь, приведет к необходимости более эффективного менеджмента оптического уровня.

Основная цель использования оборудования DWDM — предоставление большей емкости. Следствием этого может быть оптимизация использования сетей MAN и WAN в плане использования емкости, переносимой каждой длиной волны. Для сети общего пользования эта цель оптимизации использования, как правило, заканчивается предварительным перераспределением всего трафика так, чтобы группы однородных сигналов могли быть эффективно переданы на большие расстояния с минимальным количеством

точек на пути следования, требующих промежуточных решений. Однако, для трафика, проходящего по периферии транспортной сети, необходимо оборудование нового поколения, для того чтобы обеспечить более высокий уровень мониторинга трафика и иметь возможность перегруппировки трафика в оптической области для достижения баланса между гибкостью, производительностью и использованием емкости каналов.

Нам могут возразить, что в большинстве случаев нет особого экономического и практического смысла инвестировать в DWDM, чтобы затем соединить GbE по схеме точка-точка, используя отдельные длины волн в качестве несущих. Поэтому, подталкивание к агрегированию множества соединений может очень быстро привести к формированию смеси гетерогенного нестыкуемого трафика, передаваемого по общим длинам волн с множеством различных точек назначения.

Связь, как отрасль промышленности, заинтересована в том, чтобы сформировать полностью оптическую сеть связи, за исключением, быть может, пограничных переходных узлов. Эти узлы будут на территории клиента. Под словом «переходных» мы имели в виду узлы, в которых происходит переход от оптической формы представления к электрической.

Цель этой главы — описать различные шаги, которые должны быть сделаны в направлении создания полностью оптической сети связи, а также обсудить ее топологию, маршрутизацию и коммутацию в оптической области.

17.2. Требования новых оптических технологий

Ниже приведен список новых технологий и радикально новых подходов, использование которых поможет сделать оптические сети реальностью:

- оптическая коммутация;

- улучшенные схемы волнового мультиплексирования/демультиплексирования;
- настраиваемые фильтры;
- стабилизированные схемы лазеров;
- новые методы модуляции;
- улучшенные оптические усилители с плоской АВХ;
- новые крупные оптические кросс-коммутаторы;
- оптические мультиплексоры ввода/вывода;
- техника сигнализации в световой области.

17.3. Распределенная коммутация

Новая генерация управляемых оптических сетей движется в направлении *распределенной коммутации* — модели коммутации, в которой λ -переключатели, с интеллектуальными коммутационными возможностями уровня 1 (модели OSI), распределяются в различных узлах сети вдоль ее границы. Эта концепция иллюстрируется на рис. 17.1. Такая архитектура обеспечивает эффективный и гладкий менеджмент на уровне 1 различных типов разнородного трафика по всей сети, не жертвуя при этом производительностью или гибкостью, как в центральной части сети, так и на периферии. Глобальная архитектура распределенной коммутации одинаково хорошо адаптирована, как к использованию выделенных длин волн, упакованных однородным трафиком для передачи по длинным секциям с топологией точка-точка, так и для гибкой передачи разнородного трафика с динамическим назначением длин волн на коротких секциях.

При использовании кросс-коммутации вдоль границ сетевого облака, возникает необходимость поддержки управляемого оптического слоя в среде с распределенной оптической коммутацией. Это очерчивает основную проблему и представляет значительные возможности для производителей и

разработчиков, как на уровне полупроводниковых схем, так и модулей. Чтобы достичь требуемых показателей, кросс-коммутация следующего поколения должна быть теснее связана с сетью, что может быть достигнуто путем использования для коммутации уровня 1, а не уровня 2 (как это делается в традиционных сетях).

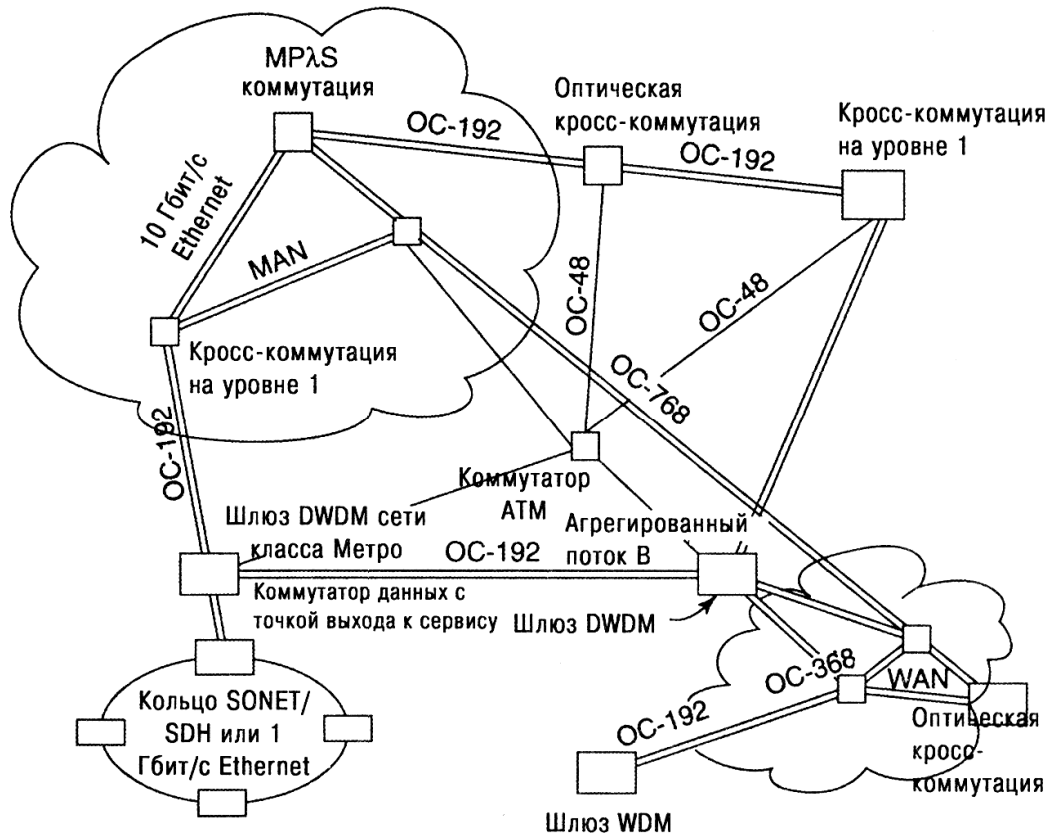


Рис. 17.1. Архитектура распределенной коммутации. Обратите внимание на комбинацию оптических коммутаторов и кросс-коммутаторов уровня 1.

(См. [17.1, 17.5, 17.6]).

Существуют два типа точек пересечения: асинхронные и синхронные. Высокоскоростные асинхронные точки пересечения дают возможность реализации MAN с неоднородным трафиком для эффективной поддержки различных типов естественного трафика в том же самом кольце. В сетях большой протяженности, возможно, будут использоваться синхронные точки пересечения нового типа, которые обеспечат необходимую производительность. Используемые при этом коммутаторы больше похожи

на коммутаторы *пространственно-временного* типа, чем на коммутаторы *пространственного* типа. Синхронные точки пересечения нового типа дадут возможность использовать процесс перегруппировки компонентов потока данных, характерный для уровня 1, который позволит селективно переключать сигналы SONET, SDH, или других TDM-технологий, между любыми комбинациями входа и выхода.

Ожидается, что возможности коммутации оптического уровня 1 будут использовать высокоскоростные синхронные ИС. Следующая генерация синхронного переключения точек переключения предложит такую возможность, как селективное перераспределение и переключение потоков STS-1 (STM-1) из фреймов STS-48 (STM-16) или STS-192 (STM-64). Эти устройства обеспечат полную гибкость при конфигурации управляемой на уровне ИС оптической кросс-коммутации от любой точки входа STS-1 до любой точки выхода STS-1. Аналогично, любой не-SONET трафик, инкапсулированный в эквивалентные контейнеры STS-N, также как любой независимо от протокола свернутый трафик, могут быть переключены с помощью тех же средств кросс-коммутации.

Эти высокоплотные, высокоскоростные коммутаторы, обладающие возможностью перераспределения потока, размещаются по краям облака коммутирующей сети. Они смогут оптимизировать использование емкости и в то же время эффективно принимать решения на уровне 1 по разделению трафика на потоки в соответствии с протоколами IP, GbE, ATM, FC (волоконный канал) или между другими типами коммутаторов уровня 2. Локализованные функции уровня 2, такие как маршрутизация и политика сетевого управления, обрабатываются соответствующим образом этими коммутаторами, тогда как коммутаторы доступа уровня 1 обеспечивают высокоскоростное переключение/перераспределение потоков, используя несущие длины волн DWDM.

17.4. Оверлейные сети

Современные сети данных можно разделить на 4 уровня:

1. Сети IP для передачи приложений;
2. Сети ATM для технического обслуживания трафика;
3. Транспортные сети SONET/SDH;
4. Сети DWDM для увеличения емкости.

Эта четырехуровневая архитектура замедлила свое развитие, демонстрируя свою неэффективность перед фотонными сетями. Многоуровневые архитектуры обычно страдают от так называемого эффекта наименьшего общего знаменателя, когда один из уровней ограничивает масштабируемость других уровней и сети в целом.

17.4.1. Появление двухуровневых сетей

Для проектировщика оптической сети известно, что залогом ее успеха является масштабируемость сети и возможность предоставить ту емкость, которая требуется клиенту. Ограничения существующей сетевой инфраструктуры сдерживают движение к этой бизнес-модели доставки сервиса. В промышленных кругах существует убеждение, что требуется разработка новых основ построения сетей. Эти новые сетевые основы должны быть такими, чтобы можно было легко адаптироваться в поддержке быстрых изменений, роста и возможности быстрого отклика на клиентские запросы по доставке сервиса. Все, что требуется — это интеллектуальный, динамичный *фотонный транспортный уровень*, развернутый для поддержки сервисного уровня.

Модель фотонной сети делит сеть на два уровня: уровень сервиса и фотонный транспортный уровень. Новая архитектура видится как комбинация преимуществ фотонной коммутации и новаций в технологии DWDM. Она доставляет мультигигабитную потоковую емкость и обеспечивает технически управляемые на уровне длин волн сетевые

интерфейсы для сервисных платформ. Последние включают: маршрутизаторы, АТМ-коммутаторы и мультиплексоры ввода-вывода SONET/SDH, которые перераспределены с транспортного на сервисный уровень. Сервисный уровень представляется опирающимся целиком на фотонный транспортный уровень, для доставки необходимой транспортной емкости туда и тогда, где и когда она требуется одноуровневым узлам или сетевым элементам (NE). Транспортная емкость предоставляется при выборе уровня гранулярности по длинам волн, а не исходя из гранулярности PDH TDM. Можно ожидать экспоненциального роста волоконной сети. Чтобы удовлетворить этим требованиям роста, нужно обеспечить быстрое снабжение ее сетевыми ресурсами, которые рассматриваются как неотъемлемая часть новой архитектуры. Хотя первые реализации этой модели будут поддерживать только обнаружение ошибок, изоляцию сбоев и восстановление сети с помощью SONET, эти функции будут постепенно расширяться, так чтобы реализовать полностью оптическую сеть.

Ожидается, что нужно иметь маршрутизаторы, АТМ-коммутаторы и мультиплексоры ввода-вывода SONET/SDH, чтобы требовать сетевую емкость там и тогда, где и когда это надо, используя возможности снабжения, заложенные в оптической коммутации, и возможности технического управления трафиком, заложенные в многопротокольной коммутации по меткам (MPLS, см. разд. 17.11). Для протокола, разработанного для оптической сети, было выбрано имя MPLS. Этот протокол был создан для объединения последних усовершенствований в технике инженерного управления трафиком MPLS и технологии фотонной коммутации, чтобы обеспечить основу для снабжения оптических каналов. Он позволит использовать единую семантику для сетевого управления в гибридных сетях, состоящих из фотонных коммутаторов, маршрутизаторов, коммутирующих по меткам (LSR), АТМ-коммутаторов и мультиплексоров ввода-вывода. Хотя предложенный подход имеет определенные преимущества для оптических систем передачи данных, он легко поддерживает и другие основные сервисы.

MPλS поддерживает основные сетевые архитектуры, оверлейные структуры и одноранговое взаимодействие, предложенное для проектирования динамически снабжаемой трафиком оптической сети.

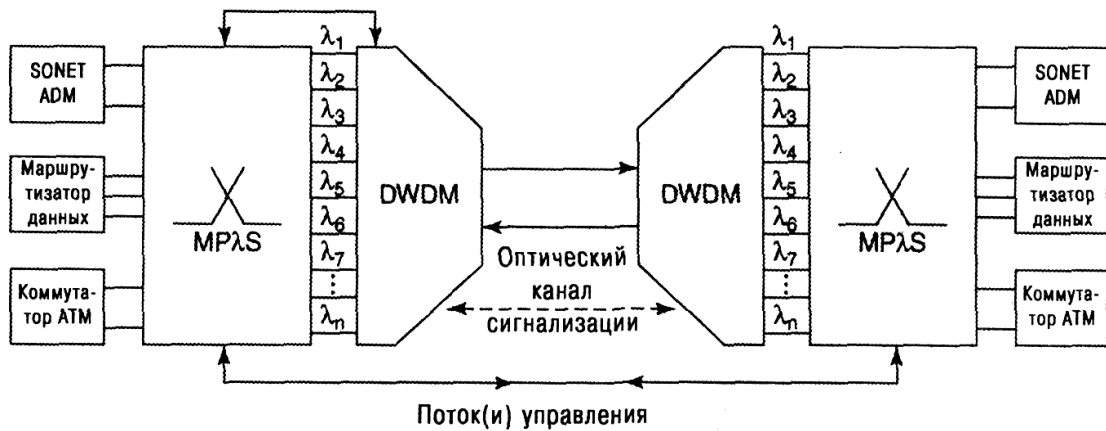


Рис. 17.2. Модель фотонной сети, иллюстрирующая два уровня (платформы): сервиса и оптического транспорта. Сервисная платформа представлена крайними левой и правой колонками и показывает сервисные средства (возможности), представленные маршрутизаторами, АТМ-коммутаторами и мультиплексорами ввода-вывода SONET/SDH. Внутри основного коммутатора — фотонный транспортный уровень, который состоит из оптических коммутаторов и оборудования DWDM. Существует стандартизованная плоскость управления, используемая для связи между элементами. (См. [17.2, 17.4, 17.5])

Модель фотонной сети представлена на рис. 17.2. Здесь сеть разделена на два уровня: сервиса и оптического транспорта. Сервисный уровень включает маршрутизаторы, АТМ-коммутаторы и мультиплексоры ввода-вывода SONET.

При использовании *оверлейной модели*, существуют две различные плоскости управления. Одна из них используется в ядре оптической сети, а другая в пограничном интерфейсе, называемом также UNI — *сетевым интерфейсом пользователя*. Взаимодействие между двумя этими плоскостями виртуально. Представленная сеть очень похожа на существующие IP/АТМ сети. Она может быть динамически (используя канал

сигнализации) или статически сконфигурирована. Внутренние операции сети прозрачны для оптических несущих, входящих через границу.

Один из недостатков оверлейной сети, который можно было бы предвидеть, в том, что она требует достаточно большого объема сигнализации и трафика управления, ввиду большого количества связей типа точка-точка, наложенных на ячеистую сеть. Это избыточное количество трафика, вызванное протоколом маршрутизации, является следствием ограниченного числа пограничных устройств в сети. Например, сообщение для одного звена сети при рассылке размножается, создавая большое количество повторяющихся сообщений.

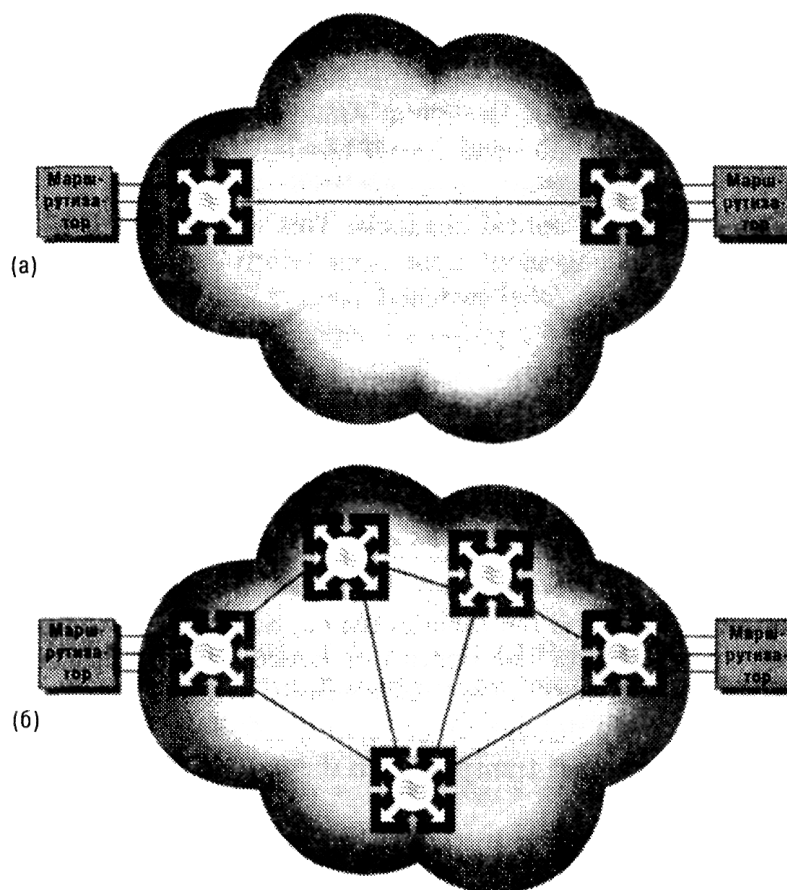


Рис. 17.3. (а) Модель оверлейной сети, (б) Модель сети с одноранговым взаимодействием. (С разрешения компании Calient Networks, см. [17.2, 17.4])

В модели с одноранговыми связями, одно действие в плоскости управления перекрывает как ядро оптической сети, так и окружающие краевые устройства, как показано на рис. 17.3. Здесь мы видим различие

между моделями оверлейной сети и сети с одноранговым взаимодействием. На рис. 17.3 (а) оверлейная модель скрывает внутреннюю топологию оптической сети, создавая оптическое сетевое облако. На рис. 17.3(б) модель сети с одноранговым взаимодействием допускает участие краевых устройств в принятии решений по маршрутизации и исключает искусственные барьеры между сетевыми доменами.

17.5. Оптическая коммутация

Оптический коммутатор — один из самых важных волоконно-оптических элементов, который поддерживает сетевую работоспособность и является гибкой платформой для маршрутизации сигнала. Сегодня коммутация в системах связи осуществляется электронными устройствами (в электрической области). Однако эволюция современных оптических сетей уже привела к тому, что маршрутизация в них полностью осуществляется в оптической области. Наиболее общие типы оптических переключателей в коммутаторах - это электрооптические или оптомеханические. *Электрооптические переключатели* состоят из оптических волноводов, сделанных в кристаллах с электрооптическими свойствами, типа ниобата лития. Конфигурации элементарных переключателей типа 1×2 и 2×2 формируются с помощью структуры интерферометра Маха—Цендера с использованием 3 дБ разветвителей (см. разд. 3.3 и 8.2). Разность фаз между двумя путями распространения сигнала в интерферометре управляется путем напряжения, приложенного к одному или к обоим путям. Эффект интерференции сигналов из обоих путей на выходе направляет сигнал к желаемому выходу в тот момент, когда напряжение, приложенное к одному или обоим путям, меняет разность фаз между ними.

Электрооптические переключатели имеют много ограничений:

- высокие вносимые потери;

- высокие потери, зависящие от поляризации;
- высокий уровень переходных помех;
- высокую чувствительность к электрическому дрейфу;
- не имеют защелок, ограничивая свое применение схемами сетевой защиты и реконфигурации;
- требуют достаточно высокого напряжения;
- имеют высокую стоимость производства.

Их принципиальным преимуществом является скорость переключения, которая лежит в наносекундном диапазоне.

Оптомеханические переключатели основаны на механически движущихся частях. Они наиболее широко используются для оптических приложений, основанных на фундаментальных оптических технологиях. Их принцип действия примитивен. Входные оптические сигналы механически переключаются путем перемещения концов волокна, призм или зеркал, в результате которого сигнал направляется или отражается по направлению к различным выходным волокнам переключателя. Движение частей переключателя должно быть прецизионным для корректного позиционирования (для этого обычно используются соленоиды). Их основной недостаток — большое время переключения - миллисекунды. Однако, эти переключатели широко используются, учитывая их низкую стоимость, простоту конструкции и хорошие оптические характеристики. Элементарные переключатели типа 1×2 и 2×2 изготавливаются промышленно. Из них легко построить небольшие матричные неблокирующие коммутаторы типа $M \times N$. Так, используя многокаскадную конфигурацию, можно построить частично неблокируемые матричные коммутаторы размера 64×64 . Однако большие размеры таких матриц достаточно сложны и громоздки. В табл. 17.1 приведены типовые спецификации оптомеханических переключателей типа 2×2 .

Типовые спецификации оптомеханических переключателей типа 2×2.

| Параметр | Единица | Спецификация |
|-----------------------------------|---------|--------------|
| Диапазон длин волн | нм | 1260-1600 |
| Вносимые потери | дБ | 0,6 |
| Потери, зависящие от поляризации | дБ | 0,05 |
| Переходная помеха | дБ | -60 |
| Скорость переключения | мс | 5 |
| Поляризационная модовая дисперсия | пс | 0,1 |
| Возвратные потери | дБ | 55 |

Источник. С разрешения компании E-Tek Dynamics [17.3].

Переключение в этом режиме — это переключение длин волн. Конфигурация DWDM, не считая мультиплексора, будет заключаться в формировании оптических длин волн, включающих от 2 до 160 длин волн и более. Предположим, что некоторые длины волн должны направляться в точку X, другие в точку Y, а третьи в точку Z. Эта случай показан на рис. 17.4.

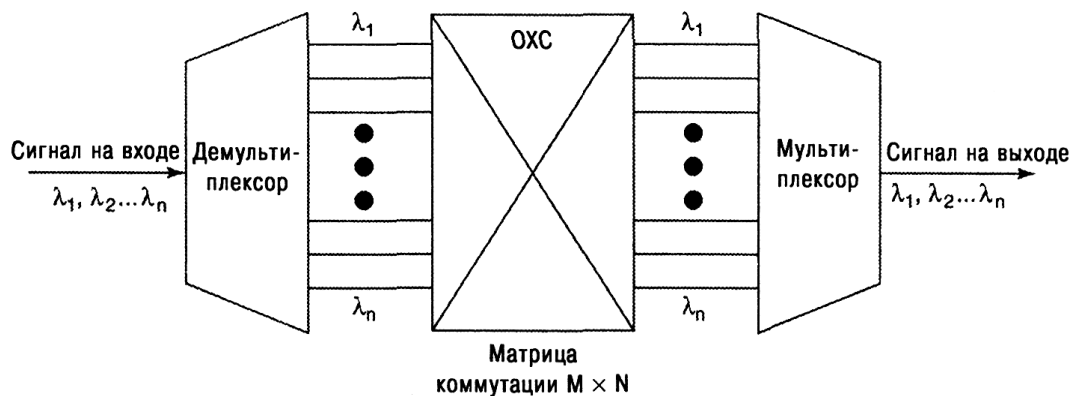


Рис. 17.4. Коммутация $M \times N$, используя оптический кросс-коммутатор. (С разрешения компании E-Tek Dynamics, см. [17.3]).

Мультиплексирование с разделением по длине волны и λ -коммутация (коммутация длин волн) тесно связаны друг с другом. В агрегатном потоке DWDM каждая длина волны должна быть четко отделена от соседних, чтобы минимизировать переходное затухание.

17.5.1. Коммутация с помощью MEMS

MEMS расшифровывается как *микроэлектромеханическая система*. Были разработаны два типа таких устройств: механические и микрогидравлические. Механические устройства используют массив микрозеркал, число которых может быть от нескольких сотен до нескольких тысяч на одном чипе. Микрогидравлические устройства основаны на движении жидкости в микро-каналах, которые были вытравлены в кристалле. В случае использования микрозеркал, массив из них изготавливается на кремнии. Входящий световой сигнал направляется до желаемого выходного порта с помощью сигнала управления, приложенного к кристаллу MEMS, который имеет возможность фиксировать позицию каждого отдельного зеркала.

Коммутаторы на MEMS классифицируются по используемому числу степеней свободы перемещения зеркала. Существуют коммутаторы с *двумерными (2D) и трехмерными (3D) переключателями*. В случае двумерных переключателей, зеркало может принимать одно из двух возможных позиций. Как правило, это позиции либо (плоскостью) вверх, либо вниз, либо бок-о-бок. Для трехмерных переключателей существует большее число позиций. Зеркало может быть установлено на шарнирном соединении и может занимать множество позиций, в том числе, и наклонено под разными углами [17.7].

В работе [17.7] показано, что большинство главных игроков в оптической коммутации придерживаются использования маршрутизаторов на основе микрозеркал. Только компания Agilent Technologies опирается на свои знания в области микрогидравлических устройств. Она разработала переключатель, на основе технологии струйных принтеров компании HP. Это устройство уникально и состоит из пересекающихся кремниевых волноводов с канавкой, вытравленной диагонально в каждой точке пересечения. Канавка содержит жидкость, которая в нормальном режиме позволяет свету проходить через переключатель. Для активации переключателя, при необходимости переключить свет, в жидкости формируются и удаляются

пузырьковые домены со скоростью сотен раз в секунду, что и дает возможность направить свет к соответствующему выходному порту [17.7].

17.5.1.1. Управление зеркалами и пузырьковыми доменами

В работе [7] рассмотрены три типа приводных механизмов, используемых в переключателях MEMS: электростатический, электромагнитный и тепловой.

Электростатический привод. Этот механизм наиболее проработан и часто используется для привода MEMS, учитывая широкий выбор проводящих и изолирующих материалов, предоставляемых технологией ИС. Используя проводники как электроды, а изоляторы для электрической изоляции электродов, можно генерировать электростатические поля прикладывая напряжение на пару электродов. Этот тип привода требует малой мощности по сравнению с другими типами и считается самым быстрым.

Электромагнитный привод. Этот тип привода обычно требует больших токов (а, значит, и больших мощностей), что может ограничить его применение. Кроме того, он использует магнитные материалы, что не свойственно технологии ИС. Они часто требуют ручной сборки, что является отличительным недостатком. Выбор магнитных материалов ограничивается теми из них, которые допускают простую микромашинную технологию. Однако электромагнитные микро-приводы допускают большую скорость и потребляют меньше энергии, чем тепловые приводы (см. ниже).

Тепловой привод. Этот тип привода требует нагревания, что происходит за счет тока, пропускаемого через устройство. Ущербность технологии в том, что нагревающие элементы имеют большое потребление мощности. Кроме того, нагретый материал должен быть охлажден до исходного состояния, а тепловыделения распространяются в окружающее пространство. Все это требует времени, что ограничивает скорость переключения устройства.

Наиболее обещающим методом изготовления MEMS является LIGA - *литографическая металлизация и прессование*. LIGA объединяет основной процесс литографии ИС с электрометаллизацией и прессованием для достижения требуемой глубины. В этом методе шаблоны создаются на подложке, которая затем электрометаллизуется для создания 3D-формы. Эти формы могут быть использованы для создания конечного продукта. Однако для этого потребуется использовать еще ряд материалов. Здесь налицо два преимущества этой технологии: могут использоваться материалы, отличные от кремния (в частности, металл и пластик), при этом могут быть созданы устройства с большими геометрическими размерами.

Коммутаторы MEMS изготавливаются сегодня с числом двунаправленных портов до 32. Цель производителей разработать приборы с матрицей размера 1000×1000. Некоторые оптические компании рассматривают эту цель в качестве первоочередной. Другие компании полагают, что лучше использовать ряд матричных наборов меньшего размера для формирования большого массива переключателей, см. [17.7]. На рис. 17.5 показан пример оптического кросс-коммутатора типа 2D MEMS с дополнительными третьей и четвертой плоскостями, добавляющими возможности ввода-вывода. Более подробно кросс-коммутаторы MEMS описаны в разд. 17.8.

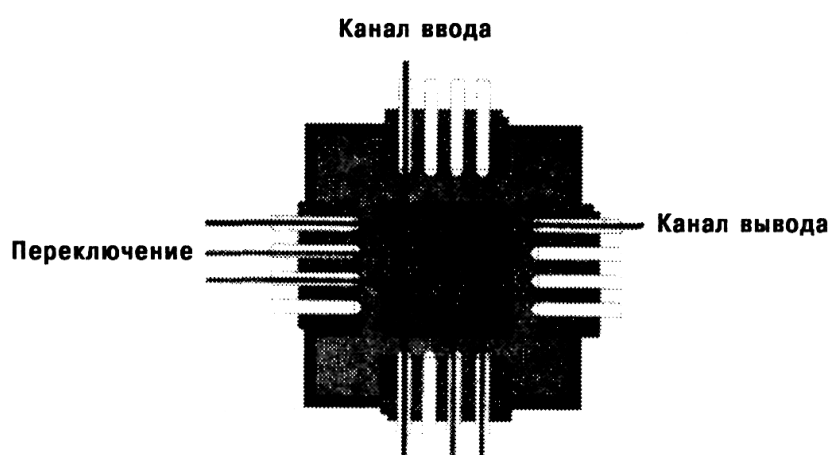


Рис. 17.5. Вид оптического кросс-коммутатора типа 2D MEMS с дополнительными 3 и 4 плоскостями, добавляющими возможности ввода-вывода. (С разрешения Zeke Kruglic, компания OMM, Inc., San Diego, CA, [17.13]).

17.6. Практические оптические мультиплексоры ввода-вывода (OADM)

Полностью оптический мультиплексор допускает обеспечение каналов оптического ввода-вывода, аналогично назначению тайм-слотов (TSA), и переназначение оптических каналов, аналогично тому, как работает обмен тайм-слотами (TSI) в современных системах электронной цифровой коммутации. На рис. 17.6 приведена блок-схема, показывающая основные функции программируемого оптического ADM. Учитывая, что эти кросс-коммутаторы будут работать с длинами волн, можно полагать, что новые узлы, требующие доступа к сети, будут добавляться более просто и можно будет уменьшить сложность процесса проектирования. Миграция к полностью оптическим уровням приводит к новым методам защиты для восстановления сети.

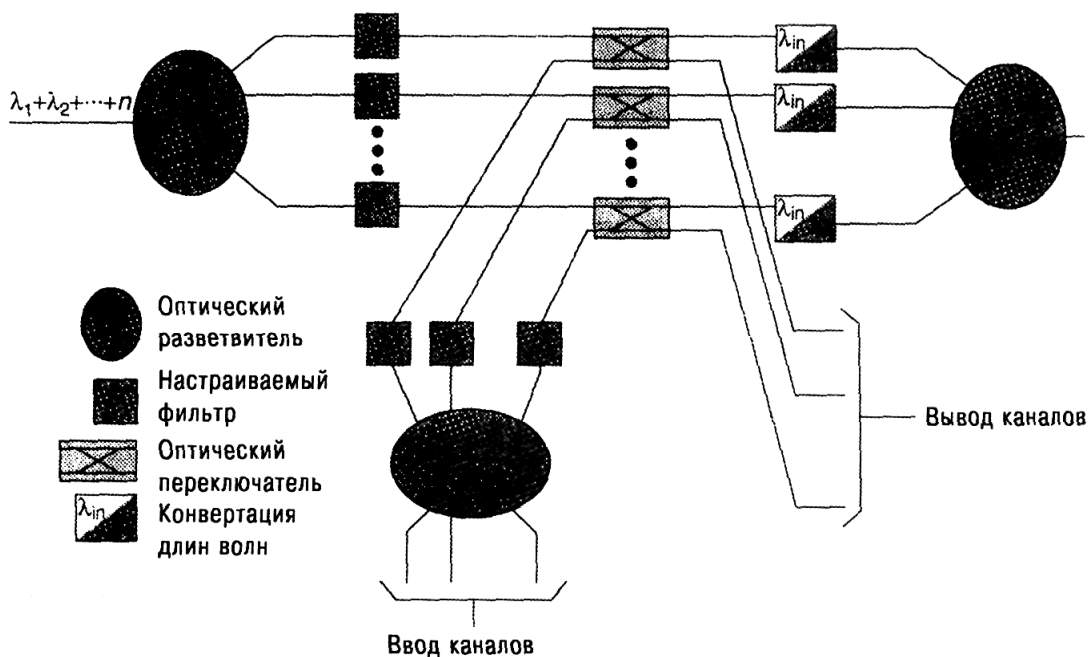


Рис. 17.6. Схема оптического мультиплексора ввода-вывода. (С разрешения компании Alcatel, [17.4], рис. 3).

Эволюция оптических сетей приведет к более совершенным системам, которые обеспечат возможность маршрутизации длин волн. Как только будут происходить технологические прорывы в области оптических вентилях и

матриц, так оптические системы кросс-коммутации начнут выходить на сцену. На рис. 17.7 приведена блок-схема оптической системы кросс-коммутации (OCCS).

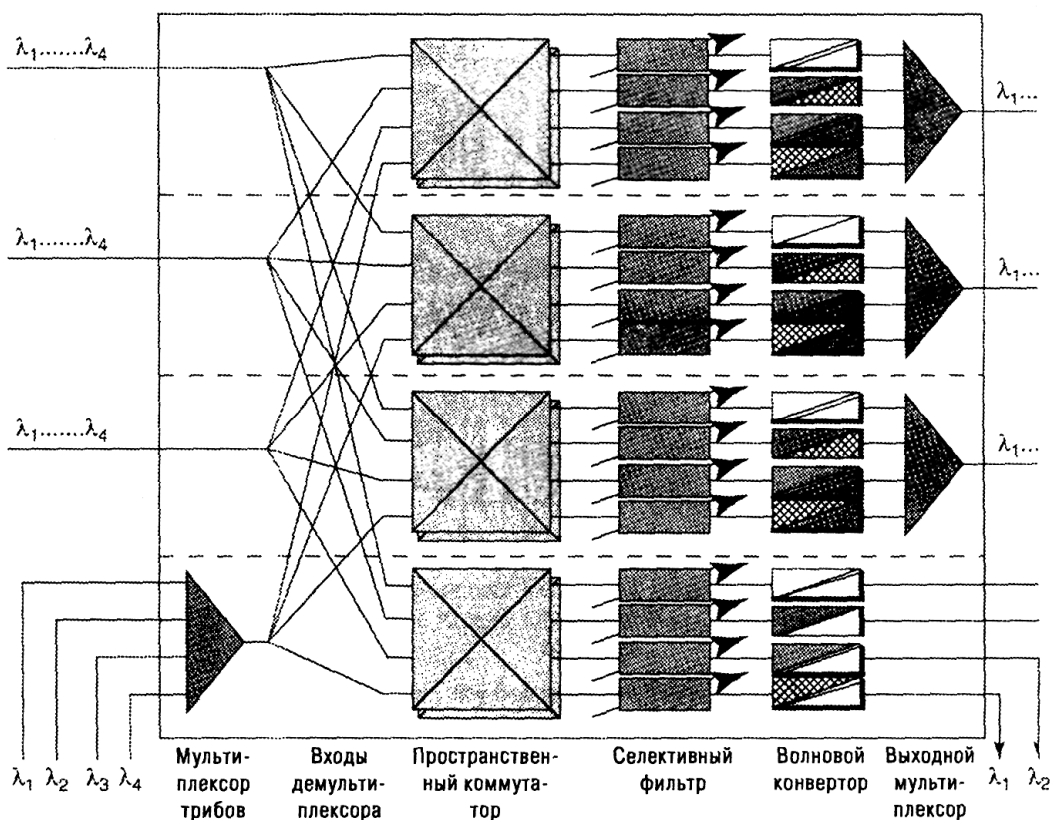


Рис. 17.7. Блок-схема оптической системы кросс-коммутации (OCCS). (С разрешения компании Alcatel, [4], рис. 4, с. 30).

Существуют два основных типа систем кросс-коммутации: с трибными входами и линейные. *OCCS с трибными входами*, или типа 1, обеспечивают функции, аналогичные тем, что имеют современные широкополосные кросс-коммутаторы SONET сегодня. *Линейные кросс-коммутаторы OCCS*, или типа 2, могут поддерживать восстановление и реконфигурацию сети высокоскоростных транспортных систем.

Как только сервисы оптических систем связи станут доступными, предполагается значительное увеличение клиентской базы и рост требований на транспортный трафик. До настоящего времени, электронные широкополосные кросс-коммутаторы удовлетворяли требованиям на предоставление

трафика в сети, однако сложность этих систем и размеры их матриц коммутации фактически достигли предела возможного. Оптические кросс-коммутаторы могут уменьшить размер и сложность электронных цифровых кросс-коммутаторов (DCS) с высоким уровнем загрузки трафика и осуществлять маршрутизацию на уровне длин волн. Сигналы могут маршрутизироваться на уровне выше, чем STS-1, и могут эффективно обрабатываться на оптическом уровне. Оптическая матрица, в действительности, потребляет меньше мощности, чем электронная матрица, переключает с более высокой скоростью и с меньшей сложностью обрабатывает большие емкости трафика. Учитывая, что большая часть взрывного роста потребностей в емкости приходится на клиентов, требующих большие емкости, можно полагать, что соединения таких клиентов будут более эффективно обрабатываться с помощью оптической матрицы, а не электронным DCS.

В настоящее время возможности полного восстановления сервиса сетей реализуются двумя основными методами: *защитой сети ячеистой топологии* с помощью DCS и *защитой сети кольцевой топологии* с помощью мультиплексоров SONET/SDH. Оба метода имеют слабые стороны: относительно большое время восстановления, высокая стоимость и низкая эффективность. Прогресс оптических сетей приведет к увеличению их эффективности по сравнению с электронными системами. Рассмотрим кольца SONET/SDH. Все мультиплексоры ввода-вывода на кольце должны работать на одной и той же скорости. В работе [17.4] указано, что это может вести к неэффективности и затрате дополнительных средств в транспортных сетях, учитывая то, что некоторые маршруты значительно более загружены по сравнению с другими. Если кольцо создано в полностью оптической сети, то некоторые длины волн могут работать на разных скоростях, например, OC-24, OC-48, OC-192.

17.6.1. OADM и OXC улучшают доступность и безотказность системы

Главным шагом в сторону создания полностью оптической сети является добавление как OADM (оптических мультиплексоров ввода-вывода), так и OXC (оптических кросс-коммутаторов). Эти сетевые элементы дают несущим возможность реконфигурировать сетевой трафик для оптимизации транспортировки данных. Они будут также иметь возможность быстрого восстановления в случае отказа линии, все это будет происходить внутри оптического уровня.

OXC — динамический коммутатор, осуществляющий соединение между любыми M входными волокнами и любыми N выходными волокнами в сети DWDM. Следовательно, оптические кросс-коммутаторы имеют в матрице конфигурации неблокирующие соединения типа $1:N$. OXC обеспечивает хорошую выживаемость сети, низкую стоимость обслуживания и реконфигурируемые пути для маршрутизации сигнала на оптическом уровне. Эти возможности помогают исключить необходимость в сложной и дорогой операции цифровой коммутации в электрической области. Так как они оперируют в оптической области, OXC могут, потенциально, аккомодироваться к терабитным потокам данных, благодаря своим оптическим несущим, высокой скорости и прозрачности протоколов [17.3].

17.7. Совершенствование управления новой сетевой архитектурой

Как говорилось выше, сетевая архитектура будет двухуровневой. Специалисты в области IP-маршрутизации и оптические специалисты договорились, что единственный путь контролировать оба уровня — это использовать протокол *многопротокольной коммутации по меткам* (MPLS). Сам протокол для этих приложений был несколько модифицирован и, как отмечалось выше, стал именоваться MP λ S. Каждая плоскость управления

(оптическая и IP-маршрутизации) имеют две фазы в программе коммутации. Одна фаза устанавливает маршрут, вторая фаза постоянная — внутри нее информация о текущем состоянии сети передается на каждый узел для формирования маршрута, а затем пакеты отправляются в путь.

MP λ S заменит два текущих протокола, работающих на нижних уровнях, с их различными вариантами, используемыми для различных случаев. Во-первых, эти традиционные семейства протоколов во многом зависят от реализации производителя. Во-вторых, IP и SONET/SDH во многом отличаются друг от друга и, в-третьих, они очень медленно работают по сравнению с тем, что необходимо при восстановлении, обеспечении трафиком и защите.

Существуют два сообщества, MPLS и MP λ S, они не согласованы лишь в одном, либо логическое управление в каждом наборе IP-маршрутизаторов, формирующих уровень IP, будет уведомлено (с точки зрения топологии) о том, какая последовательность прохода в ОХС формирует световой маршрут через облако оптической сети, либо оптический уровень установит этот маршрут независимо, а затем сообщит IP-уровню, где его конечные точки, без уведомления о том, какая последовательность прохода в ОХС формирует световой маршрут. Некоторые исследователи (Paul Green, [17.5]) полагают, что будет преобладать второй вариант, по крайней мере, сначала.

Защитное переключение, рассмотренное выше в разд. 12.5, в первую очередь привлекло внимание при рассмотрении вопросов целостности оптического уровня. Для активации защитного переключения, требуется предварительно загруженная программа/алгоритм, подобный тому, который используется в системах SONET/SDH. Включение защитного переключения оказывает воздействие только на небольшую часть сети. Это функция оптического уровня, и спусковым механизмом для его активации может быть потеря (требуемого) уровня отношения оптический сигнал/шум (OSNR).

Аналогично тому, что имеет место в существующих схемах защитного переключения, в нашем случае также есть фаза восстановления, в которой

происходит замена отказавшего оптического пути на другой. Как только процесс восстановления закончен, этот отказавший блок, ставший теперь работающим, переходит в категорию защитного блока.

Обеспечение трафиком/реконфигурация становится довольно интересным аспектом. В работе [17.5] описано условие прокладки «запасной» волоконной емкости, где емкость волокна или кабеля намеренно остается неиспользованной (так называемые «темные волокна»). Эта емкость может быть разделена между операторами сетей, кто может устанавливать на них оборудование, при условии уплаты ренты в расчете на одну несущую.

17.8. Полностью оптические кросс-коммутаторы

Уже в процессе подготовки этой книги на сцене появились большие полностью оптические кросс-коммутаторы. Это были *микроэлектромеханические системы* (MEMS), которые вначале были устройствами типа 2D, а сейчас эволюционировали в устройства типа 3D. При разработке концепции коммутатора MEMS типа 2D был использован опыт создания старых аналоговых схем матричных коммутаторов. MEMS содержит N^2 поворачивающихся зеркал, которые отклоняют коллимированный свет, переводя его от входного порта к выходному, так как показано на рис. 17.8(а). На рис. 17.8(б) показан механизм переключения MEMS, состоящий только из $2N$ зеркал, N из которых направляют входы на определенные выходы, а другие N — направляют выходы обратно к входам. В работе [17.5] утверждается, что преимуществом схем типа 3D является линейная зависимость масштабируемости от числа портов (по сравнению с квадратичной зависимостью для схем типа 2D, но они требуют аналогового управления наклоном зеркала, в отличие от цифрового (двоичного) для схем типа 2D.

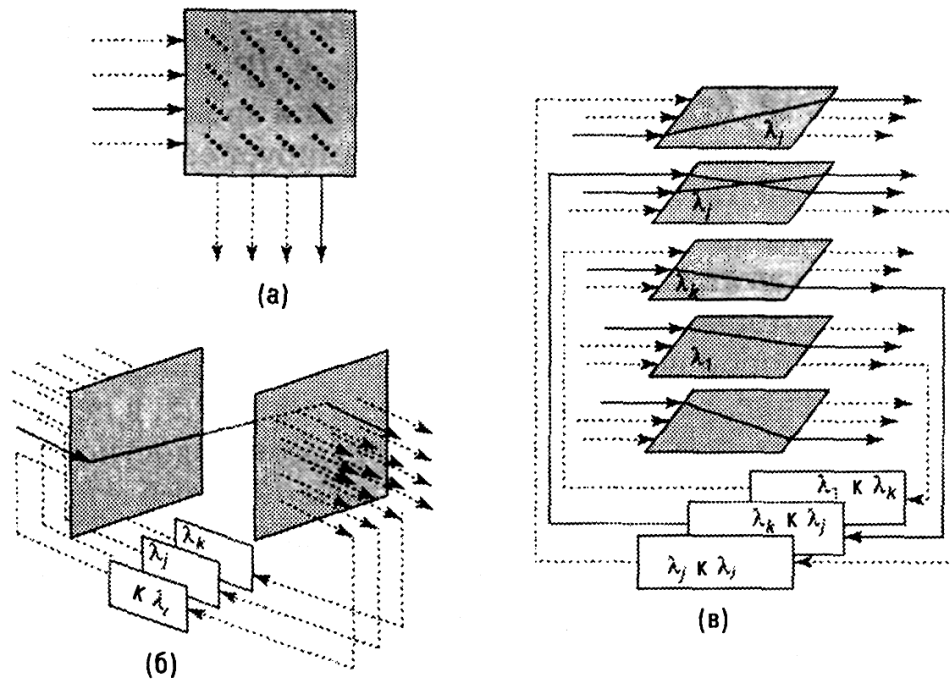


Рис. 17.8. Оптические кросс-коммутаторы (ОХС). (а) типа 2D, использует двоичное управление положением зеркала, (б) тип 3D, использует аналоговое управление положением зеркала, (в) многоплоскостная (мультиплановая) архитектура, использующая множество модулей типа 2D, внизу показан набор блоков волновых конверторов. (С разрешения IEEE Communications Magazine, [17.5], рис. 3).

Схемы ОХС типа 3D имеют другие преимущества. Устройства с большим количеством портов могут быть использованы для обслуживания как всего, так и части волокна с большим количеством несущих длин волн. Их стоимость относительно низкая и они не страдают от большого затухания, вызванного наличием большого количества внутренних соединений, требуемых для реализации больших неблокирующих $N \times N$ структур из множества (N) небольших элементов типа 2D. Эти элементы имеют размеры не более 32×32 [17.5].

Еще одна проблема возникает в случае использования ОХС только для WDM коммутации, т.е. для оптического переключения длин волн, — это прозрачность протокола. Внутри ОХС мы хотели бы иметь путь между дли-

ной волны А и любым выходом, соединенным с длиной волны В. При увеличении числа длин волн, резко возрастает число необходимых для коммутации путей «от - до». Число лазеров в волновых конверторах может быть уменьшено за счет использования настраиваемых лазеров.

17.9. Варианты сигнализации для оптического уровня

Предполагается, что оптическая сеть является сетью, *ориентированной на соединение*. Соединения в такой сети требуют использования процедур установления и разрыва соединений. Реализующие их протоколы сигнализации являются программными продуктами, которые могут накладывать ограничения на емкость коммутатора по обработке вызовов.

С точки зрения перспектив управления и сигнализации, две модели сетей эволюционировали, чтобы создать интероперабельность между IP и оптическим уровнями. Существует *модель однорангового взаимодействия*, которая основана на предположении, что интеллектуальное управление может быть передано IP-уровню, который предполагается ответственным за полное (из конца в конец) управление.

Второй моделью является *модель клиент-сервер*. Эта модель основана на предположении, что оптический уровень интеллектуально независим и служит открытой платформой для динамического взаимодействия множества клиентских уровней, включая и уровень IP.

В этом случае мы предполагаем, что оптическая сеть является ячеистой. Плоскость управления является IP-совместимой, основанной на протоколе MPLS, рассмотренном выше. В качестве протоколов маршрутизации служит семейство протоколов IP, включая протоколы исследования топологии сети. Протоколы сигнализации MPLS используются для автоматического обеспечения трафиком. Ожидается, что стек протоколов управления оптического уровня на основе IP будет стандартизован к тому

времени, как только модель будет одобрена.

Приложения требуют различной обработки. Плоскость оптического управления будет управлять *динамическим обеспечением длинами волн* вместе с маршрутизаторами на границе сетевого облака, подключенных с помощью оптических подсетей, как показано на рис. 17.9.

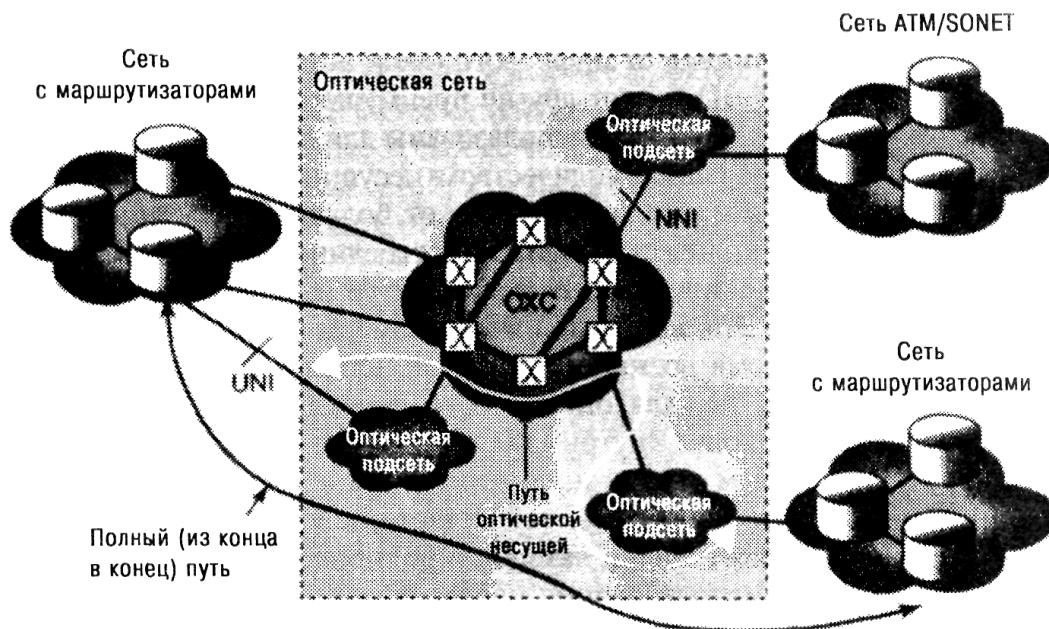


Рис. 17.9. Иллюстрация модели клиент-сервер. Оптический уровень имеет интеллектуальное управление оптическими линиями. Сеть состоит из подсетей, соединенных известными интерфейсами. (С разрешения компании Calient Networks, San Jose, CA, [17.12]).

Когда маршрутизатор сталкивается с перегрузкой, то либо сетевая система управления, либо сам маршрутизатор запросит обеспечения его дополнительными длинами волн, т.е. оптическими несущими. Это требует, чтобы оптические коммутаторы имели возможность создавать новые или усиленные сервисные возможности (каналы), такие, как каналы емкостью ОС-48 или ОС-192, чтобы удовлетворить потребности данного маршрутизатора. Это динамическое обеспечение длинами волн может адаптироваться к потоку нагрузки.

Модель клиент-сервер обрабатывает разные вещи по-разному. Она позволит каждому маршрутизатору взаимодействовать непосредственно с оп-

тической сетью, используя хорошо известные интерфейсы типа UNI (*интерфейс пользователь-сеть*). Взаимодействие между подсетями должно осуществляться через интерфейс типа NNI (*интерфейс сеть-сеть*). Это позволяет каждой подсети развиваться независимо.

В оптических сетях, как и в проводных или радиосетях, операторы хотят иметь преимущество, конкурируя с другими, и поэтому строят сети с использованием оборудования разных производителей. Поступая так, им требуется стандартная интероперабельность.

Когда мы сравниваем две модели, то видим, что модель клиент-сервер имеет значительные преимущества перед одноранговой моделью в том, что она быстрее приводит нас к интероперабельности. Кроме того, модель клиент-сервер более прямая и простая. Для администрирования маршрутов на оптических линиях из конца в конец требуются дополнительные связи между IP и оптическими уровнями. Эти дополнительные связи будут распространяться по всему сетевому облаку.

17.10. Четыре класса оптических сетей

17.10.1. Общие типы сетей

Независимо от того, являются ли они электрическими или оптическими, существует три общих типа сетей (несколько вольная классификация автора, так как ниже приведены два типа сетей расклассифицированных только по одному признаку. (*Прим. ред.*)): два из них - ATM и PSTN (обе требуют *предварительного установления соединения* — CO) и третья IP (не требует установления соединения — *дейтаграммная* - CL). Они, конечно, также могут быть отнесены к категории сетей с пакетной коммутацией (ATM и IP) и коммутацией цепей (PSTN).

Проектировщики оптических сетей изменили определение понятия цепи в сетях с пакетной коммутацией и коммутацией цепей, для того чтобы

удовлетворить специальным запросам со стороны оптических сетей.

Коммутация цепей основана на позиции, в том смысле, что бит, приходящий в определенной *входной позиции*, коммутируется в другую, *выходную позицию*. Эта позиция определяется комбинацией из одной или больше (до трех) размерностей: номер порта (пространственная координата), время и длина волны.

Пакетная коммутация основана на метке, в том смысле, что она использует интеллектуальную информацию, заложенную в заголовке, которую мы называем *метка*, с тем, чтобы решить, где и как переключить пакет. А теперь рассмотрим, как эти определения отличаются от обычных. Если это касается данных, то цепь может быть соединена (установлена) до того, как нужно произвести обмен пакетами, и, следовательно, удается удовлетворить обычному определению, но это установление соединения не стало необходимым неотъемлемым признаком (вспомним о понятии PVC в технологиях X.25 и Frame Relay).

В случае оптических сетей, также важно отметить, была ли цепь соединена (установлена) до момента обмена данными, или же принадлежала к категории цепей типа CL или CO, а не к категории цепей в сети с пакетной коммутацией или с коммутацией цепей. Упрощая, можно сказать, что сеть IP — типичный пример CL-сети с пакетной коммутацией, а ATM - пример CO-сети с пакетной коммутацией. При этом мы понимаем, что когда протокол резервирования ресурсов (RSVP) или/и протокол MPLS добавляют CO-режим функционирования к IP-сетям, то может произойти путаница в семантике. Тем самым мы одобряем наши примеры с ATM и IP.

Дадим краткий обзор четырех классов оптических сетей. Классификация сетей основана на типах используемых элементов: сети с оптическими линиями, сети широкополосной передачи с выбором нужной длины волны (сети типа B&S), сети с маршрутизацией длин волн (сети типа WR) и фотонные сети с пакетной коммутацией. Эти типы сетей представлены в табл. 17.2 с указанием, какие типы элементов в них могут

быть использованы.

Таблица 17.2

Типы оптических элементов и основанные на них классы оптических сетей.

| Типы оптических элементов | Классы оптических сетей | | | |
|---|-----------------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|
| | Сети с оптическим и линиями | Сети типа B&S | Сети типа WR | Фотонные сети с коммутацией пакетов |
| Оптические элементы некоммутируемого типа | √ | √ | √ | √ |
| Настраиваемые трансиверы | X | √ | (+/-) | (+/-) |
| Коммутаторные элементы (ОХС и OADM) | X | X | √ | (+/-) |
| Коммутаторы оптических пакетов | X | X | X | √ |

Замечания. Знак √ используется для обозначения оптических элементов некоммутируемого типа; знак X — для обозначения коммутаторных элементов, знак (+/-) используется для обозначения возможности наличия или отсутствия данного типа оптического элемента в данном классе оптических сетей.

Источник. См. IEEE Communications Magazine, [17.6], Табл.1, с. 121.

Сети с оптическими линиями определяются как сети, использующие электронные кросс-коммутаторы, соединенные оптическими линиями, как од-ноканальные, так и многоканальные. Под многоканальными линиями понимаются линии, отходящие от WDM мультиплексора/демультиплексора с любого конца. Пассивные разветвители WDM типа звезда используются для создания каналов широковещательной передачи для операций совместного использования среды передачи. Эти два типа элементов не программируются, в результате реконфигурация невозможна.

На рис. 17.10 показаны классы оптических сетей. На нем показаны три группы двойных колонок: (а), (б) и (в). В колонке (а) перечислены все оптические сети, использующие электронную коммутацию. В колонке (б) перечислены сети типа B&S с одним скачком и фотонные сети пакетной комму-

тации. Эти классы сетей являются примерами сетей, использующих полностью оптическую коммутацию. В колонке (в) перечислены сети типа В&S со многими скачками и сети типа WR. Эти типы сетей используют гибридные коммутаторы оптоэлектронного типа.

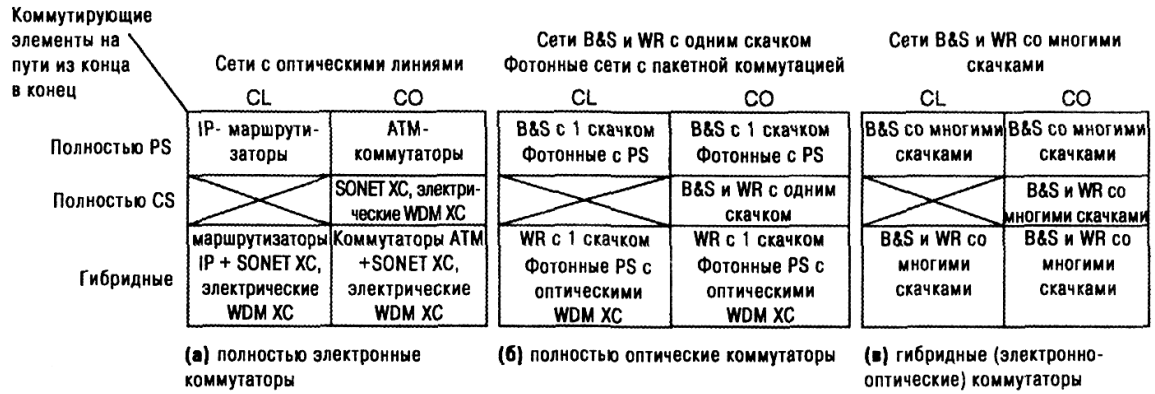


Рис. 17.10. Классификация оптических сетей. В&S - широковещательная передача с выбором нужной длины волны, WR — маршрутизация длин волн, CL - без установления соединения - дейтаграммная, CO — с предварительным установлением соединения, CS — с коммутацией цепей, PS - с коммутацией пакетов, XC - кросс-коммутация. (Основана на источнике IEEE Communications Magazine, [17.6], рис.3, с. 120).

Сети типа В&S с одним скачком имеют оптические передатчики и приемники, которые могут быть настроены на разные режимы работы: пакет за пакетом или вызов за вызовом. Все три сетевые технологии теоретически возможны в сетях типа В&S с одним скачком, как показано на рис. 17.10, столбец (б).

Существуют также сети типа В&S со многими скачками. В сетях этого типа данные передаются по всем линиям (так называемая широковещательная передача, или бродкастинг). Электронные коммутаторы эффективно обеспечивают преобразование длин волн на пути между источником и назначением, так как не все узлы принимают все волны. В этом смысле такие сети классифицируются как сети В&S, в настраиваемых передатчиках и приемниках используется только оптическое переключение. Электронные

коммутаторы могут использоваться как в сетях с коммутацией цепей, так и коммутацией пакетов, так как элементы коммутатора могут быть настроены либо на режим обработки пакет за пакетом или вызов за вызовом. Сети типа В&S со многими скачками могут использоваться во всех категориях колонки (в) рис. 17.10, за исключением категории CS-CL.

Сети типа WR включают оптические коммутаторы цепей, которые мы будем называть ОХС и OADM. Эти сети также могут иметь оптические настраиваемые передатчики и приемники. Сети WR могут быть *с одним скачком* или *многими скачками*. Сети с одним скачком используют только коммутирующие элементы, поэтому они указаны в колонке (б).

Последней категорией оптических сетей являются *фотонные сети пакетной коммутации*. Мы можем рассматривать эти сети, как сети, имеющие оптические пакетные коммутаторы и (по выбору) коммутаторы цепей с настраиваемыми передатчиками и приемниками. См. также колонку (б).

Из всех сетей, приведенных на рис. 17.10, только сети с оптическими линиями доступны сегодня и являются функционирующими. Из оставшихся трех, индустрия связи сконцентрировала свое внимание на сетях типа WR. Сети WR со многими скачками и электронными коммутаторами пакетов являются наиболее часто встречающимися [17.6]. Примером такой сети может быть сеть IP, соединенная оптическими коммутаторами цепей, такими как OADM/ОХС.

17.11. Обзор многопротокольной коммутации с использованием меток (MPLS)

Основана на документе Интернет RFC 3031.

17.11.1. Введение

MPLS появился вследствие развития IP и очень похож на этот хорошо известный протокол. Он использует скачок за скачком *маршрутизацию от источника* и пользуется *метками*, которые фактически похожи на адреса, подобные тем, что имеются у других протоколов, например, в пакетах Frame Relay, ячейках ATM и так далее. Используемые метки зависят от того, какая среда передачи используется.

Мы уделили достаточно большое внимание протоколу MPLS, потому что верим в то, что он станет главным игроком на арене оптических сетей. Следует заметить, что термин *мультипротокольный* в названии протокола означает, что техника MPLS применима к любому сетевому протоколу.

17.11.2. Основные термины технологии MPLS

Метка - короткий, фиксированной длины, непрерывный идентификатор, используемый для идентификации FEC, обычно локальный (по значимости).

Слияние меток — замена многих входных меток для конкретного FEC на одну выходную метку.

LDP — протокол распределения меток.

LSP — маршрут с коммутацией по меткам

FEC — класс эквивалентности перенаправления/форвардинга (при маршрутизации).

LSR — маршрутизатор с коммутацией по меткам

LER — пограничный маршрутизатор по меткам

17.11.3. Архитектура MPLS-сетей

В соответствии с действием сетевого протокола в дейтаграммной сети, пакет путешествует от одного маршрутизатора до другого, причем каждый маршрутизатор на маршруте делает независимое решение о перенаправлении/форвардинге этого пакета. Вся информация о маршруте содержится в

заголовке пакета. Каждый маршрутизатор использует алгоритм маршрутизации сетевого уровня для определения маршрута конкретного пакета. В этом режиме маршрутизации скачок за скачком, каждый маршрутизатор независимо выбирает следующий скачок для пакета, основываясь на анализе заголовка пакета и результатов работы алгоритма маршрутизации. Концепция MPLS построена на стандарте IP и иллюстрируется рис. 17.11.

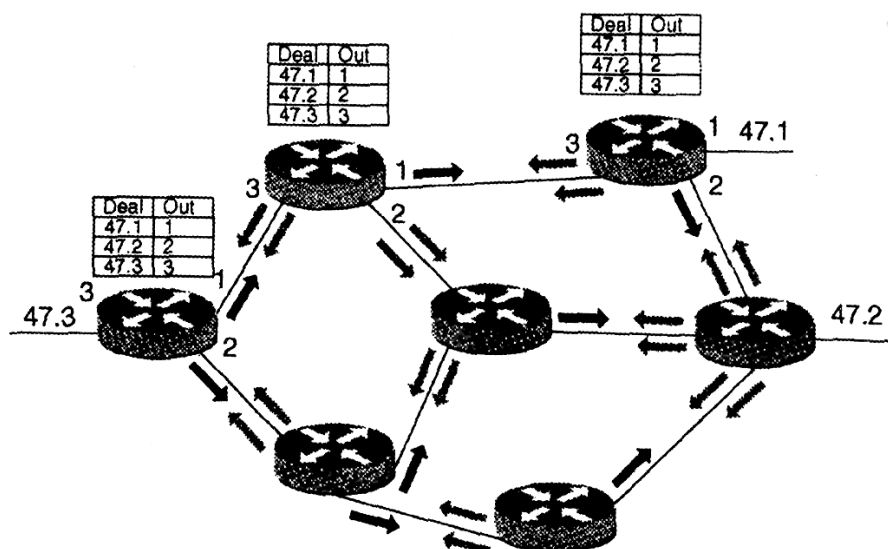


Рис. 17.11. MPLS построен на основе стандартного IP. Обратите внимание на таблицы маршрутизации. (См. [17.10])

Заголовок пакета содержит значительно больше информации, чем требуется, просто для того, чтобы выбрать следующий скачок. Выбор следующего скачка, поэтому рассматривается как композиция двух функций. Первая функция разделяет полный набор возможных пакетов на ряд *классов эквивалентности перенаправления/форвардинга* (FEC). Вторая функция отображает каждый FEC на следующий скачок. Что касается решения о перенаправлении/форвардинге, то различные пакеты, которые отображены в ту же самую FEC, становятся неразличимыми. Все пакеты, принадлежащие к определенному FEC и путешествующие от определенного узла, будут следовать по тому же маршруту. Если же используется какой-то вариант многомаршрутной маршрутизации, то они все будут следовать по одному из возможных маршрутов, ассоциированных с данным FEC.

При обычном IP-форвардинге, конкретный маршрутизатор, как правило, рассматривает два пакета, отображенных на один FEC, чтобы определить, является ли некий адресный префикс X в таблице маршрутизации маршрутизатора таким, что X оказывается *самым длинным соответствием* (по числу совпавших позиций) для каждого адреса назначения пакета. В то время как пакет проходит через сеть, на каждом скачке он снова экзаменуется, на предмет присвоения его какому-то FEC.

В MPLS назначение определенного пакета определенному FEC осуществляется только один раз, как только пакет попадает в сеть. FEC, которому этот пакет предназначен, кодируется коротким, фиксированной длины, полем, известным как *метка*. Когда пакет перенаправляется на следующем скачке, указанная метка посылается вместе с ним. Это значит, что пакет помечается меткой раньше, чем перенаправляется.

При последующих скачках не происходит дальнейшего анализа пакетного заголовка сетевого уровня. Скорее метка используется как индекс в таблице, которая определяет следующий скачок и новую таблицу. Старая метка заменяется новой, и пакет перенаправляется на следующий скачок.

В программе форвардинга с использованием MPLS, как только пакету назначается FEC, дальнейшего анализа заголовка последующими маршрутизаторами не происходит. Весь процесс перенаправления приводится в действие метками. Ниже приведены ряд преимуществ MPLS форвардинга над обычным форвардингом сетевого уровня.

1. MPLS форвардинг может быть осуществлен с помощью коммутаторов, которые способны найти метку и осуществить замену, но не способны анализировать заголовок сетевого уровня, или не способны анализировать заголовок сетевого уровня с требуемой скоростью.

2. Учитывая, что пакет назначается FEC, когда он входит в сеть, можно использовать специальный маршрутизатор доступа для определения такого назначения, а также любой информации о пакете, даже если эта информация не может быть получена из анализа заголовка пакета. Например, пакеты,

прибывающие на разные порты, могут быть назначены разным FEC. Обычный форвардинг, с другой стороны, может рассматривать только ту информацию, которая прибывает вместе с пакетом в его заголовке.

3. Пакет, который вошел в сеть через определенный маршрутизатор, может быть помечен отлично от того, как он был бы помечен, если бы он вошел в сеть через другой маршрутизатор. В результате характер решения о форвардинге может зависеть от маршрутизатора доступа. Это не может быть сделано с помощью обычного форвардинга, потому что информация о маршрутизаторе доступа не передается вместе с пакетом.

4. Рассмотрение того, как пакет назначается FEC, может стать все более и более сложным, без какого-то влияния со стороны маршрутизаторов, которые просто перенаправляют и помечают пакеты метками.

5. Иногда желательно заставить пакет следовать по определенному маршруту, который был выбран явно в момент или до того, как пакет вошел в сеть, а не был выбран в результате обычной работы алгоритма динамической маршрутизации, осуществляемой в процессе прохождения пакета по сети. Это может быть сделано в результате определенной сетевой политики или для поддержки инженерных решений при обработке трафика. При обычном форвардинге это требует, чтобы пакет нес кодировку своего пути вместе с собой (*маршрутизация от источника*). При MPLS форвардинге метка может быть использована для представления маршрута, так что не нужно передавать вместе с пакетом информацию о принадлежности к определенному маршруту.

Некоторые маршрутизаторы анализируют заголовок сетевого уровня пакета не только для того, чтобы просто выбрать следующий скачок пакета, но и для того, чтобы определить *предпочтительность*, или *класс сервиса* пакета. Они могут впоследствии использовать различные пороги отбрасывания (пакетов) или реализации дисциплин обслуживания для различных типов пакетов. MPLS позволяет, но не требует, чтобы предпочтительность, или класс сервиса пакета, был полностью или частично

получен на основании метки. В этом случае можно сказать, что метка представляет собой комбинацию FEC и предпочтительности, или класса сервиса пакета [17.8].

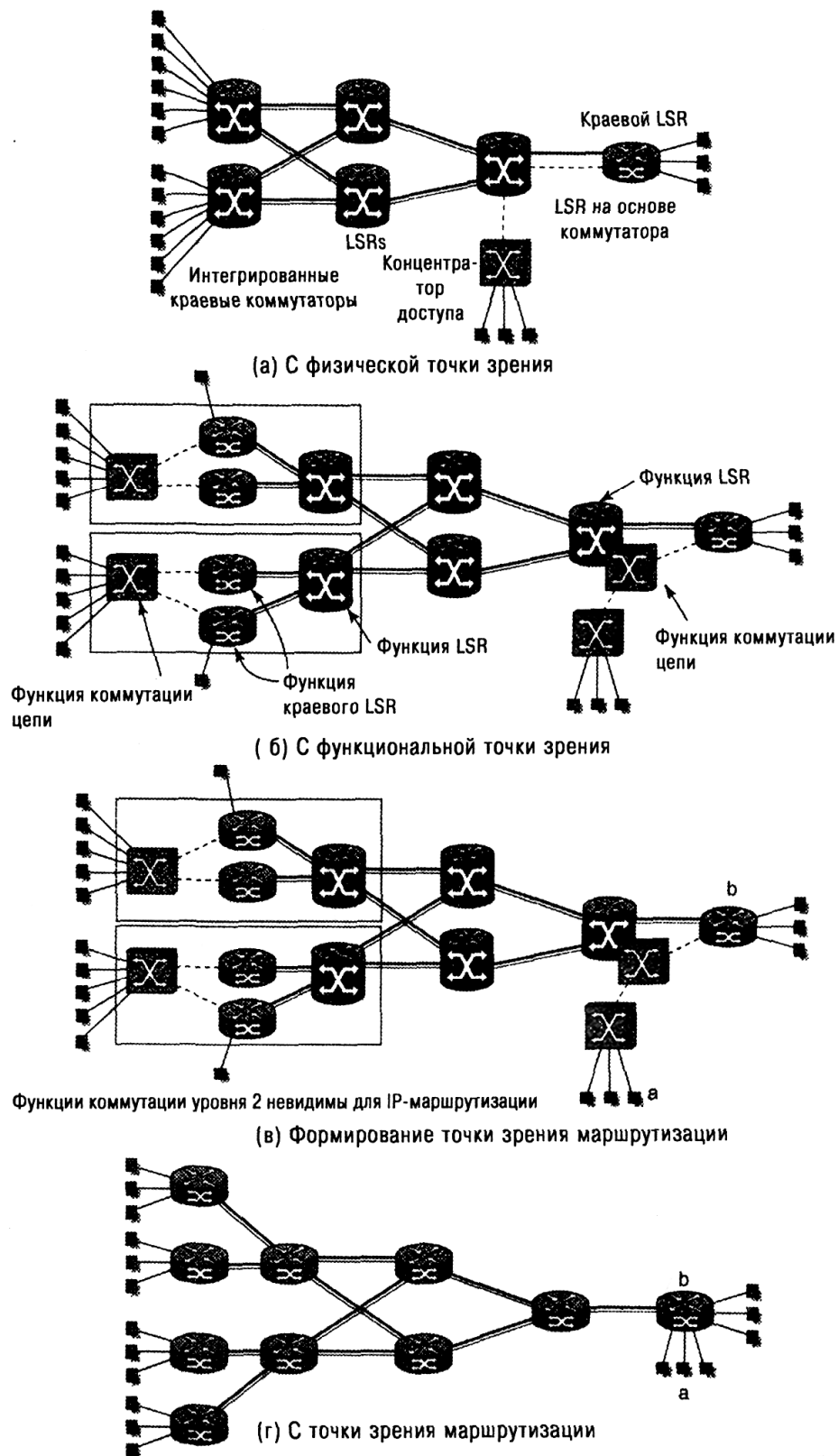


Рис. 17.12. Различные точки зрения на сети MPLS. (См. IEEE Communications Magazine, [17.8], рис. 5, с. 140)

На рис. 17.12 показано, что можно иметь несколько точек зрения на MPLS:

1. Физическая точка зрения показана рис. 17.12(а). Эта точка зрения представляет физические устройства и линии в сети.

2. Функциональная точка зрения показана на рис. 17.12(б). Мы можем видеть, где устройства имеют несколько функций, они показаны отдельно. Например, рис. 17.12 включает два крайних устройства MPLS, типа тех, что возможны сегодня [17.8]. Каждый из этих двух устройств включает два функционально разделенных крайних LSR и один просто LSR. Дополнительно каждый из крайних устройств включает функции коммутации PVC (постоянных виртуальных цепей), которые функционально отделены от функций LSR.

3. С точки зрения маршрутизации (см. рис. 17.12(в),(г)) сеть выглядит так, как она выглядит с точки зрения протокола IP. Эти рисунки получены с использованием рис. 17.12(б) следующим образом:

а) Коммутаторы уровня 2 и функции коммутации PVC невидимы для IP-маршрутизации. Если клиентская сторона соединена с маршрутизатором с помощью PVC, то виртуальная цепь видится IP-маршрутизатором, как прямое соединение с одним скачком. Например, отметим узлы, помеченные на рис. 17.12(в), и предположим, что все они соединены с крайним LSR b. Тогда, с точки зрения маршрутизации, эти узлы непосредственно примыкают к маршрутизатору b.

б) Каждый крайний LSR или просто LSR соответствует маршрутизатору с точки зрения маршрутизации.

Проектирование IP-маршрутизации в сети MPLS в общем случае такой же процесс, как и проектирование IP-маршрутизации для обычной IP-сети. В соответствии с точкой зрения маршрутизации, сеть может быть разделена на области протокола внутренней маршрутизации, затем может быть спроектирован объединенный вариант, и т. д. [17.8].

17.12. Заключение

Сеть состоит из коммутаторов и линий связи, соединяющих эти коммутаторы. Коммутаторы, линии связи и устройства относятся к аппаратному обеспечению. Дополнительно сеть требует средства доступа и методы маршрутизации сообщения. В этой части сеть имеет дело с протоколами, известными как программное обеспечение. Может показаться, что мы описываем обычные электронные сети, хотя фактически мы имеем дело с оптическими сетями. В этой главе были рассмотрены возможные комбинации программно-аппаратного обеспечения для доступных оптических сетей настоящего и будущего. Мы обсуждали вопросы пропорций: сколько сетей останется электронными и сколько оптическими. Мы полагаем, что по-настоящему полностью оптические сети все еще остаются иллюзией и целью на будущее. Оптическую сигнализацию, использованную для формирования цепей в сетях, ориентированных на соединение, и заголовки в сообщениях для дейтаграммных сетей будет трудно реализовать с помощью технологий современного уровня.

Список литературы

Глава 1

1. Roger L. Freeman, *Telecommunication Transmission Handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
2. *Fiber Optics System Design*, MIL-HDBK-415, US Department of Defense, Washington, DC, 1985.
3. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.

Глава 2

1. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
2. *Fiber Optics System Design*, MIL-HDBK-415, US Department of Defense, Washington, DC, 1985.
3. Donald J. Sterling, Jr., *A Technician's Guide to Fiber Optics*, 3rd ed., Delmar Publishers, Albany, NY, 2000.
4. *Introduction of Fiber Optics*, Coming Cable Systems, Hickory, NC, 2000.
5. *Fiber Optic Catalog*, Belden Wire and Cable Company, Richmond, IN, 1998.
6. *Loose Tube vs. Tight Buffered Cable in Outdoor Applications*, AEN 26 Rev. 4, Coming Cable Systems, Hickory, NC, 2000.
7. *Coming, Cable Systems LANscape Catalog*, Premises Fiber Optic Products Catalog, 7th ed., Coming Cable Systems, Hickory, NC, January 2000.
8. The Facts: Matched-Clad vs. Depressed-Clad Fiber, *Coming News & Views*, Coming, NY, April 1999.
9. *Generic Requirements for Optical Fiber and Optical Fiber Cable*, Telcordia (Bellcore) GR-20-CORE Issue 2, Piscataway, NJ, July 1998.
10. Product flyer, «Corning LEAF® Non-Zero Dispersion-Shifted Single-Mode Fiber» Coming, NY, 1999.

Глава 3

1. Tyco Electronics, Fiber Optic Division, catalog 1307895, Harrisburg, PA, May 2000.
2. Corning *Cable Systems Design Guide*, Release 4, Corning Cable Systems, Hickory, NC, 1999.
3. *An Introduction to Fiber Optic Networking*, AMP (Tyco Electronics), Harrisburg, PA, 1995.
4. *Single Fiber Fusion Splicing*, Corning Application Note AN 103, Corning, Inc., Corning, NY, June 1999.
5. Australian Photonics CRC lecture series. From the Internet at <http://central.vislab.usyd.edu.au/photonics/devices/networks/coupler>, October 2001.
6. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
7. *Guide to WDM Technology, 2nd ed.*, EXFO Electrical-Optical Engineering Co., Varnier, Quebec, Canada, 2000.
8. *Transmission Characteristics of Passive Optical Components*, ITU-T Rec. G.671, ITU Geneva, November 1996.
9. *Generic Requirements for Fiber Branching Components*, Telcordia GR-1209-CORE, Issue 3, Piscataway, NJ, March 2001.
10. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed., IEEE, New York, 1996.
11. Overview of Selected IEC (International Electrical Commission) References.

Глава 4

1. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, NY, 1997.
2. *Optical Fibres Systems Planning Guide*, CCITT, Geneva, 1998.
3. Stamatios K. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM Technology*, IEEE Press, New York, 1999.

4. *Fiber Optics System Design*, MIL-HDBK-415, US Department of Defense, Washington, DC, February 1985.
5. *Lightwave* (Magazine), World-wide Directory of Fiber Optic Communications Products and Services, Pennwell Corp., Tulsa, OK, March 25, 2000.
6. Lucent Technologies Advance Data Sheet (from the Web), C488-Type Laser Transmitter, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ, February 2000. (Now Agere Technologies.)
7. OKI Technical Review, «Optical Transmitter Module for 10 Gbps Optical Communication Systems,» OKI Electric Industry, Inc., No. 158, Vol. 63, Sunnyvale, CA, April 1997.
8. Roger L. Freeman, *Telecommunication Transmission Handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
9. Cindana Tukatte, Iolon Inc. «Tunable-laser Technologies vs. Optical-networking Requirements,» *Lightwave*, March 2001, page 136.
10. Vince Sykes, K2 Optronics, «External-Cavity Diode Lasers for Ultra-Dense WDM Networks,» *Lightwave*, March 2001, page 130.
11. Private communication, Iolon, Inc., March 30, 2002.

Глава 5

1. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
2. 1998 New England Photoconductor, from the Web at www.netcorp.net/ici.
3. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed., IEEE New York, 1996.
4. *Reference Data for Radio Engineers*, 5th ed., ITT Howard W. Sams, Indianapolis, IN, 1968.
5. Roger L. Freeman, *Reference Manual for Telecommunication Engineers*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1994.
6. Paul E. Green, *Fiber Optic Networks*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

7. *A Primer on Photodiode Technology*, Centra Vision, Newbury Park, CA, 2000, from the Web at www.west.net/~centro/tech2.htm.
8. *Responsivity of Standard InGaAs Photodiodes*, Fermionics, Inc., Simi Valley, CA, from the Web at www.fermionics.com/R1300.htm.
9. *Photodiode Basics*, Silicon Sensors, Inc., Dodgeville, WI, 2000, from the Web at www.siliconsensors.com.
10. *Optical Fibres Systems Planning Guide*, CCITT, ITU Geneva, 1989.
11. *Avalanche Photodiodes: A Users' Guide*, PerkinElmer Optoelectronics, Santa Clara, CA, 2000, from the Web at www.perkinelmer.com.
12. Private communication, Epitaxx Inc., Mark Itzler on AADs for 10 Gbps applications.
13. R. J. McIntyre, Multiplication Noise in Uniform Avalanche Photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-13, pages 164-168, 1966.
14. *Fiber Optic System Design*, MIL-HDBK-415, US Department of Defense, Washington, DC, February 1985.
15. *Optical Interfaces for Equipment and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy*, ITU-T Rec. G.957, ITU Geneva, July 1999.
16. *Transport Systems Generic Requirements (TSGR): Common Requirements*, Bellcore (Telcordia) GR-499-CORE, Issue 2, December 1998, Bellcore (Telcordia), Piscataway, NJ.
17. Abhay M. Joshi, *DC to 65 GHz. Wide Bandwidth InGaAs Photodiodes and Photoreceivers*, Fiber Optics Forum, Discovery Semiconductors, Inc., Princeton, NJ, March 2000, from the Web at www.chipsat.com.
18. *Optical Eye Pattern Measurement Procedure*, EIA/TIA-526-4 Rev. A, EIA/TIA, Washington, DC, 1997.

Глава 6

1. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems, 2nd ed.*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
2. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, *6th ed.*,

- IEEE, New York, 1996.*
3. *Characteristics of a Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable*, ITU-T Rec. G.653, ITU Geneva, April 1997.
 4. *Guide to WDM Technology Testing*, 2nd ed., EXPO Electro-Optical Engineering, Inc., Quebec City, Canada, 2000.
 5. *Characteristics of Single Mode Optical Fiber Cable*, ITU-T Rec. G.652, ITU Geneva, April 1997.
 6. *Characteristics of Non-Zero Dispersion Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable*, ITU-T Rec. G.655, ITU Geneva, October 1996.
 7. Andre Girard, Handling Special Effects: «Non-Linearity, Chromatic Dispersion, Soliton Waves,» *Lightwave*, July 2000.
 8. *Characteristics of a Cut-off Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable*, ITU-T Rec. G.654, ITU Geneva, April 1997.
 9. G. Mahike and P. Goessing, *Fiber Optic Cables*, 3rd ed., Siemens Berlin-Munich, John Wiley & Sons, New York, 1997.
 10. *Applications Related Aspects of Optical Fiber Amplifier Devices and Subsystems*, ITU-T Rec. G.663, ITU Geneva, October 1996.

Глава 7

1. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
2. *Guide to WDM Technology Testing*, EXPO Electro-Optical Engineering Inc., Quebec City, Canada, 2000.
3. S. Shimada and H. Ishio, eds., *Optical Amplifiers and Their Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, England, 1992.
4. Thomas Fuerst, Today's Optical Amplifiers Enable Tomorrow's Optical Layer, *Lightwave*, July 1997.
5. Makoto Shimizu, Non-Silica-Based Fiber Amplifiers Open New Wavelength Regions for WDM, *Lightwave*, November 1999.
6. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed.,

- IEEE Std-100-96, IEEE Press, New York, 1996.
7. *Application-Related Aspects of Optical Fiber Amplifier Devices and Subsystems*, ITU-T Rec. G.663, ITU Geneva, October 1996.
 8. *Telcordia Notes on Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) and Optical Networks*, Special Report, SR Notes, Series 02, Issue 1, Telecordia, Piscataway, NJ, May 2000.
 9. *SONET Regenerator (SONET RGTR) Equipment Generic Criteria*, Technical Reference TR-NWT-000918, Issue 1, Piscataway, NJ, December 1990.
 10. Alan Evans, Raman Amplification Key to Solving Capacity, System-Reach Demands, Corning, Inc., from *Lightwave*, August 2000, page 69.
 11. Ashiqur Rahman, Design Issues of Distributed Raman Amplifiers for Reduced Noise Accumulation in Long-Haul, Repeated Transmission, *Lightwave*, August 2000, page 70.
 12. *Introduction to SONET*. Hewlett-Packard seminar, Burlington, MA 1993.
 13. *Synchronous Optical Network (SONET)—Basic Description including Multiplex Structure, Rates and Formats*. ANSI T1.105-1995, ANSI, New York, 1995.
 14. Private communication, Pierre Talbot, Inc., Quebec City, Canada, April 4, 2002.
 15. Private communication. Dr. Alan Evans, Corning, Inc., Corning, NY, April 4, 2002.

Глава 8

1. *Telcordia Notes on Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM) and Optical Networks*, Special Report, SR-NOTES-SERIES-02, Issue 1, Piscataway, NJ, May 2000.
2. Stamatios V. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM Technology*, IEEE Press, New York, 2000.
3. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.

4. Technical promotional material from the Web at www.sel-rtp.com/products/passives/Components/fbg.html, Sumitomo Electric Lightwave Corp., Research Triangle, NC.
5. Lucent Technologies, from the Web at www.lucent.com/micro/opto, Lucent Technologies, Allentown, PA.
6. *Optical Interfaces for Multi-Channel Systems with Optical Amplifiers*, ITU-T Rec. G.692, ITU Geneva, October 1998.
7. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed., IEEE, New York, December 1996.
8. Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), from the Web at www.adc.com, ADC Telecommunications, Minneapolis, MN, August 1998.
9. Bob Shine and Jerry Bautista, Interleavers Make High-channel-count Systems Economical (Wavesplitter Technologies), *Lightwave*, August 2000, page 140.
10. Franck Chatain, Fiber Bragg Grating Technology Passes Light to New Passive Components, *Lightwave*, March 2001, page 186.
11. Karen Liu and John Ryan, «The Animals in the Zoo: The Expanding Menagerie of Optical Components,» *IEEE Communications Magazine*, July 2001, page 110.

Глава 9

1. Synchronous Optical Network (SONET)—Basic Description Including Multiplex Structure, Rates and Formats, *ANSI T1.105-1995*, ANSI, New York, 1995.
2. Roger L. Freeman, Reference Manual for Telecommunications Engineering, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2001.
3. C. A. Siller and M. Shaft, eds., SONET/SDH, IEEE Press, New York, 1996.
4. Roger L. Freeman, Telecommunication Transmission Handbook, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
5. Network-Node Interface for the Synchronous Digital Hierarchy (SDH), ITU-T Rec. G. 707, ITU Geneva, March 1996.

6. Synchronous Optical Network (SONET), Transport Systems, Common Generic Criteria, *Telecordia GR-253-CORE, Issue 3, Rev. 2, Piscataway, NJ, September 2000.*
7. *Introduction to SONET, Seminar, Hewlett-Packard Co., Burlington, MA, November 1993.*
8. SONET Add-Drop Multiplex Equipment (SONET ADM) Generic Criteria, *Bellcore, TR-TSY-000496, Issue 2, Bellcore, Piscataway, NJ, 1989.*
9. Automatic Protection Switching for SONET, *Telecordia Special Report SR-NWT-001756, Issue 1, Piscataway, NJ, October 1990.*
10. SONET Dual-Fed Unidirectional Path Switched Ring (UPSR) Equipment Generic Criteria, *Telecordia GR-1400-CORE, Issue 2, Piscataway, NJ, January 1999.*
11. SONET Bidirectional Line-Switched Ring Equipment Generic Criteria, *Telecordia GR-1230-CORE, Issue 4, Piscataway, NJ, December 1998.*
12. *Telecordia Notes on the Synchronous Optical Network (SONET), Special Report, SR-NOTES, Series 01, Issue 1, Piscataway, NJ, December 1999.*
13. Network Node Interfaces for Synchronous Digital Hierarchy, *ITU-T Rec. CJOT, ITU Geneva, March 1996.*

Глава 10

1. Characteristics of a Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fiber Cable, *ITU-T Rec. O.653, ITU Geneva, April 1997.*
2. Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy, *ITU-T Rec. G.957, ITU Geneva, June 1999.*
3. Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunication Equipment, *Telecordia GR-468-CORE, Issue 1, Piscataway, NJ, December 1998.*
4. Generic Requirements for Assuring the Reliability of Components Used in Telecommunication Systems. *Telecordia TR-NWT-U00357- Issue 2, Piscataway, NJ, October 1993.*

5. Roger L. Freeman, *Telecommunication Transmission Handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
6. Error Performance Parameters and Objectives for International, Constant Bit Rate Digital Paths at or Above the Primary Rate, *ITU-T Rec. G.826*, ITU Geneva, February 1999.
7. Characteristics of Cut-Off Shifted Single-Mode Optic Fiber Cable, *ITU-T Rec. G.654*, ITU, Geneva, April 1997,
8. Transmission Characteristics of Passive Optical Components, *ITU-T Rec. G.671*, ITU, Geneva, November 1996.
9. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed., IEEE, New York, 1996.
10. Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
11. Donald J. Sterling, Jr., *Technician's Guide to Fiber Optics*, 3rd ed., Dehner, Albany, NY, 2000.
12. *Optical Interfaces for Multichannel Systems with Amplifiers*, ITU-T Rec. 0.692, ITU Geneva, October 1998.
13. Karen Liu and John Ryan, «All the Animals in the Zoo: The Expanding Menagerie of Optical Components/» *IEEE Communications Magazine*, page 110, July 2001.

Глава 11

1. Standard for Physical Location and Protection of Below-Ground Fiber Optic Cable Plant, *TIA/EIA-590-A*, Telecommunications Industry Association, Washington, DC, January 1997.
2. Optical Fibres Systems Planning Guide, *CCITT-ITU*, Geneva, 1989.
3. Bob Chomyez, *Fiber Optic Installer's Field Manual*, McGraw-Hill, New York, 2000.
4. Digital Line Systems Based on 1544 kbps and 2048 kbps Hierarchy on Optical Fibre Cables, *ITU-T Rec. G.955*, ITU Geneva, November 1995.

5. General Features of Optical Fibre Submarine Cable Systems, *ITU-T Rec. G.971, ITU Geneva, November 1996.*
6. Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre Cable, *ITU-T Rec. G.652, ITU Geneva, April 1997.*
7. *CommScope HFC Upgrade Manual, Vol. 2, Fiber, CommScope of North Carolina, 1999.*

Глава 12

1. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, *6th ed., IEEE, New York, 1996.*
2. Reliability Prediction of Electronic Equipment, *MIL-STD-217E, US Department of Defense, Washington, DC, 1986.*
3. Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment, *Telcordia Technical Reference TR-332, Issue 5, Piscataway, NJ, December 1997.*
4. Reliability and Quality Measurement's for Telecommunication System (RQMS-Wireline), *Telcordia GR-929-CORE, Issue 5, Piscataway, NJ, December 1999.*
5. Parameters and Calculation Methodologies for Reliability and Availability of Fibre Optic Systems, *ITU-T Rec. G.911, ITU Geneva, April 1997.*
6. Transport Systems Generic Requirements (TSGR): Common Requirements, *Telcordia GR-499-CORE, Issue 2, Piscataway, NJ, December 1998.*
7. SONET Bidirectional Line-Switched Ring Equipment Generic Criteria, *Telcordia GR-1230-CORE, Issue 4, Piscataway, NJ, December 1998.*
8. Synchronous Optical Network (SONET)—Automatic Protection Switching, *ANSI T1.105.01-1998 (prepared by the Alliance for Telecommunications Industry Solutions), ANSI, New York, 1998.*
9. Telcordia Notes on the Synchronous Optical Network (SONET), *Telcordia Special Report SR-NOTES-Series-01, Issue 1, Piscataway, NJ, December 1999.*
10. SONET Dual-Fed Unidirectional Path-Switched Ring (UPSR) Equipment Generic Criteria, *Telcordia GR-1400-CORE, Issue 2, Piscataway, NJ, January*

- 1999.
11. Synchronous Digital Hierarchy Management, *ITU-T Rec. G.784*, ITU Geneva, 2000.
 12. Digital Hierarchy—Layer 1 In-Service Digital Transmission Performance Monitoring, *ANSI Tl.231-1997*, ANSI, New York, 1997.
 13. SONET / SDH: A Sourcebook of Synchronous Networking, *Curtis A. Siller, Jr., and Mansoor Shaft, eds., IEEE Press, New York, 199A*; see the following articles: *Rodney J. Boehm, Progress in Standardization of SONET, IEEE LCS, May 1999. Rony Holler, SDH/SONET-A Network Management Viewpoint, IEEE Network, November 1990.*
 14. OTGR Section 12.1: Operations Application Messages—Language for Operations Application Messages, *Telcordia GR-831*, Piscataway, NJ- November 1996.
 15. Reliability Manual, *(Bellcore) Telcordia SR-TSY-000385*, Piscataway, NJ, June 1986.

Глава 13

1. *Roger L. Freeman, Telecommunication Transmission Handbook, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, 1975.*
2. *Roger L. Freeman, Reference Manual for Telecommunication Engineering, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.*
3. International Computer Power, Dynamic Energy Storage System Extended Ride-through Kinetic Battery (Flywheel Systems), from the Web at www.rotoups.com (01/29/01).
4. *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications, IEEE Std. 446-1987, IEEE, New York, 1987.*
5. Ormat Corp. promotional material for OEC power systems, Ormat Corp., 980 Greg Street, Sparks, Nevada 89431-6039, February 1, 2001 (www.ormat.com).

Глава 14

1. Walter Ciciora, James Farmer, and David Large, *Modem Cable Television Technology*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA 1999.
2. *Electrical Performance for Television Transmission Systems*, EIA/TIA-250C, EIA/TIA Washington, DC, January 1990.
3. George Scherer, private communication, GI/Motorola, Hatsboro, PA, February 15, 2001.
4. *Code of Federal Regulations*, 47, Parts 73.600 and 76, US Government Printing Office, Washington, DC, revised October 1996.
5. Eric Schweitzer, «Return Path Technologies,» *Communications Technology*, February 2001.
6. Roger L. Freeman, *Telecommunication Transmission Handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
7. Roger L. Freeman, *Reference Manual for Telecommunication Engineers*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
8. HFC Virgraph presentation, ADC Communications, Minneapolis, MN, 1993.
9. Private communication, Chuck Grothaus, ADC Communications, Jan 31, 2002 (permission to publish).

Глава 15

1. *Commercial Building Telecommunications Cabling Standard*, ANSI/TIA/EIA-568B.1, TIA, Arlington, VA, April 12, 2001.
2. *Design Guide*, Release 4, Coming Cable Systems, Hickory, NC 28603-0489, March 1999.
3. *Detail Specification for 62.5 μ m Core Diameter/125 μ m Cladding Diameter Class Ia Graded-Index Multimode Optical Fibers*, ANSI/TIA/EIA-492AAAA-A, TIA, Arlington, VA (no date).
4. *Optical Fiber Cabling Components Standard*, ANSI/TIA/EIA-568-B.3, TIA Arlington, VA, April 2000.
5. *Centralized Optical Fiber Cabling Guidelines*, ANSI/TIA TSB72, TIA,

- Arlington, VA, October 1995.
6. *Fiber Selection Guide for Premises Networks*, Coming WP1160, Corning Fiber Systems, Corning, NY, May 1998.
 7. Dan Schaefer, bda, «Taking Stock of Premises-Network Performance,» *Lightwave*, page 70, April 2001.
 8. *The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms*, 6th ed., IEEE, New York, 1996.
 9. *Benchmarking Methodology for Network Interconnection Devices*, RFC 2544, March 1999, from the Internet.
 10. Agilent Technologies Test and Measurement Catalog 2001, Agilent, Palo Alto, CA, 2001.

Глава 16

1. *Beginner's Guide to Using the HP 8147 Optical Time Domain Reflectometer*, Product Note, Hewlett-Packard (Agilent Technologies), Santa Clara, CA, 1996.
2. Bob Chomycz, *fiber Optic Installer's Field Manual*, McGraw-Hill, New York, 2000.
3. Roger L. Freeman, *Telecommunication System Engineering*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
4. *Guide to WDM Technology Testing*, EXFO, Quebec City, Canada, 2000.
5. *Agilent 71400 Lightwave Signal Analyzer*, Application Note 371, Agilent Technologies, Englewood, CO, 2000.
6. *Optical Spectrum Analysis*, Agilent Application Note 1550-4, Agilent Technologies, Englewood, CO, 2000.

Глава 17

1. Michael Sluyski, AMCC, The Evolution of Crossconnects within the Emerging Managed Optical Layer, *Lightwave*, June 2000.
2. Luc Ceuppens, Multiprotocol Lambda Switching Comes Together, *Lightwave*, August 2000. page 80.

3. Ronnie Chua and Yiqun Hu, Optical Switches Are Key Components in High-Capacity, Data-Centric Networks, *Lightwave*, November 1999, page 43.
4. Tim Krause, *Migration to All-Optical Networks*, Alcatel Raleigh, July 24, 2000, from the Web at www.usa.alcatel.com/telecom.
5. Paul Green, Progress in Optical Networking, *IEEE Communications Magazine*, January 2001.
6. Malathi Veeraraghavan, Ramesh Karri, et al. Architectures and Protocols That Enable New Applications on Optical Networks, *IEEE Communications Magazine*, March 2001.
7. Mariene Bourne, MEMS Switching... and Beyond, Cahners In-Stat Group, *Lightwave*, March 2001, page 204.
8. Jeremy Lawrence, Cisco Systems, Designing Multiprotocol Label Switching Networks, *IEEE Communications Magazine*, July 2001, page 134.
9. *MPLS Architecture*, E. Rosen et al., RFC 3031, January 2001. From the Internet.
10. Internet: www.nanog.org/mtg-9905/ppt/mpls, October 23, 2001.
11. Marc Fernandez and E. Kruglic, MEMS Technology Ushers in New Age in Optical Switching, *Lightwave*, August 2000, page 146.
12. Private communication, Luc Ceuppens, Calient Networks, San Jose, CA.
13. Private communication, Ezekial Kruglick, OMM Inc., San Diego, CA.

**Список литературы на русском языке, добавленный редактором
перевода**

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. / Под ред. П.В. Мамышева. — М.: Мир, 1996. - 324 с.
2. Вербовецкий А.А. Основы проектирования цифровых оптоэлектронных систем связи. — М.: Радио и связь, 2000. - 159 с.
3. Волоконная оптика. Сб. статей. — М.: Оптиктелеком/Изд-во «ВиКо», 2002. — 158 с.
4. Волоконно-оптическая техника: История, достижения, перспективы. Под

- ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. - М.: АО «ВОТ»/Изд-во Connect, 2000. - 376 с.
5. Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справочник / И.И.Гроднев, А.Г.Му-радян, Р.М.Шарафутдинов и др. - М.: Радио и связь, 1993. — 264 с.
 6. Жирар, Андрэ. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. — М.: EXFO, 2001. / Пер. а англ, под ред. А.М.Бродниковского, Р.Р.Убайдуллаева, А.В.Шмалько (на компакт диске).
 7. Засецкий А.В., А.Б.Иванов, С.Д.Постников, И.В.Соколов. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Обслуживание, качество услуг, бизнес-управление. Часть II. — М: Syrus Systems. 2001. - 336 с.
 8. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Syrus Systems, 1999. - 672 с.
 9. Иванов А.Б. Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Измерения, анализ, тестирование и мониторинг. Часть I. - М.: Сайрус Системе, 2000. - 376 с.
 - 10.Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. — М.: Эко-Трендз, 2002. - 283 с.
 - 11.Кабельные линии связи. История развития в очерках и воспоминаниях. — М.: Радио и связь, 2002. — 656 с. — В.Г.Бакланов, А.С.Воронцов, В.Н.Гордиенко и др.
 - 12.Листвин А.В., В.Н.Листвин, Д.В.Швырков. Оптические волокна для линий связи. - М.: ЛЕСАРарт, 2003. - 288 с.
 - 13.Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели (Основы проектирования кабелей. Планирование систем). Изд. второе, переработ, и доп. Пер. с немец, под. ред. В.Г.Фокина. - «Lingua-9», Новосибирск/»Publicis MCD Werbeagentur GmbH, GWA, Erlangen and Munich, 2001. - 345 с.
 - 14.Оптические кабели связи российского производства. Справочник. - М.: Эко-Трендз, 2003. - 288 с. Авт.: Воронцов А.С., Турин И.О.,

Мифтяхетдинов С.Х., Никольский К.К., Питерских С.Э.

15. Семенов, А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. — М.: КомпьютерПресс, 1998. - 302 с.
16. Семенов А.Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов. - М.: ДМК Пресс/Компания АйТи, 2003. - 416 с.
17. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. 4-е издание. - М.: ДМК Пресс, 2002. - 640 с.
18. Скворцов Б.В., В.И.Иванов, В.В.Крухмалев и др. Оптические системы передачи: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1994. — 224 с.
19. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи. - М.: Салон-Р, 2001.-237 с.
20. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. М.: Изд-во "Эко-Трендз", 4-е изд., 1999, 148с.
21. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи (ATM, PDH, SDH, SONET и WDM). - М.: «Радио и связь», 2-е исправленное изд., 2003. - 468с.
22. Смирнов И.Г. Структурированные кабельные системы. - М.: Эко-Трендз, 1998. - 179 с.
23. Стерлинг, Дональд Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. — М.: "Лори", 1998. - 288 с. 288 с.
24. Строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий связи: Учебник для вузов/В.А.Андреев, В.А.Бурдин, В.Б.Попов и др. — М.: Радио и Связь, 1995. — 200с.
25. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 2-е стереотипное изд. 2002. - 269 с.
26. Шмалько А.В. Цифровые сети связи: основы планирования и построения. - М.: Эко-Трендз, 2001. - 283 с.