

При волновом (спектральном) мультиплексировании оптических сигналов серии электрических импульсов от трех источников поступают в оптические передатчики, где модулируют оптические несущие с разными длинами волн.

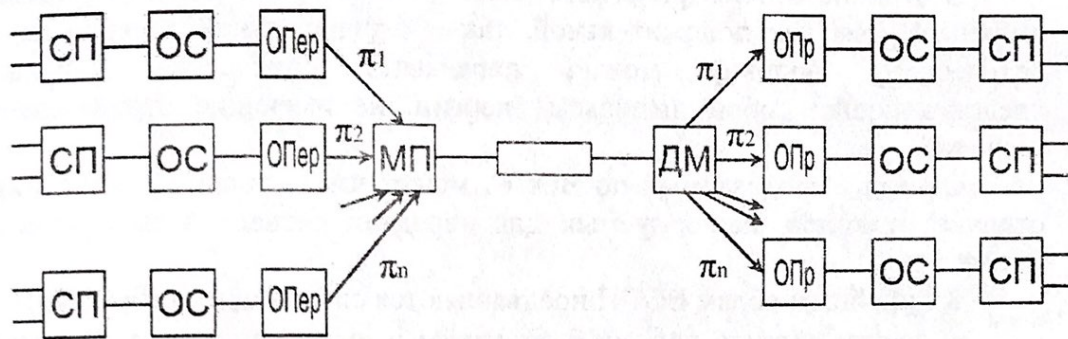


Рисунок 19

На передающей станции электрические сигналы от нескольких СП поступают на оборудование сопряжения ОС, где из линейного кода ЦСП преобразуется в линейный код ВОСП.

Оптические передатчики преобразуют сигнал из электрической формы в оптическую, причем каждый оптический передатчик имеет свою длину волны. С помощью мультиплексора МП оптические сигналы объединяются в групповой сигнал и передаются по ОВ.

На приеме демодулятор ДМ разделяет оптические сигналы, т.к. они отличаются друг от друга длиной волны. Оптический приемник преобразует сигнал из оптической формы в электрическую.

ОС – оборудование сопряжения – преобразует код ВОСП в линейный код ЦСП, и сигнал поступает на каналобразующее оборудование ЦСП.

Таким образом, по одному ОВ организуется несколько спектрально разделённых каналов, что значительно увеличивает пропускную способность ОВ.

На промежуточных узлах некоторые каналы могут быть добавлены или выделены из составного сигнала посредством мультиплексоров ввода/вывода.

Применение технологии WDM позволяет исключить дополнительную прокладку ОК в существующей сети.

Недостатком метода является заметное проявление нелинейных эффектов из-за относительно высоких плотностей оптических мощностей. В результате возникает взаимодействие между монохроматическими световыми потоками, которое еще более усиливается при использовании оптических усилителей.

## Лекция 7. Линейные коды ВОСП

Цель лекции: рассмотреть коды используемые в ВОСП.

В отличие от электрического кабеля, по которому можно передавать импульсы тока как положительной, так и отрицательной полярности, по оптическому волокну можно передавать оптические импульсы, представляющие собой импульсы энергии, не имеющие отрицательных значений.

Сигнал, передаваемый по ВОЛС, может иметь только 2 состояния в отличие от кодов, используемых для передачи сигнала в электрической форме.

К линейным кодам ВОСП предъявляются следующие требования:

- спектр сигнала должен быть узким и иметь ограничение сверху и снизу;
- код должен обеспечивать возможность выделения тактовой частоты;
- код должен обладать максимальной помехоустойчивостью, что позволяет увеличить длину участка регенерации;
- код должен обладать информационной избыточностью;
- код должен быть простым для практической реализации.

Для формирования линейных сигналов ВОСП используют блочные коды вида  $nVmB$ :

где  $n$  – означает число кодируемых разрядов;

$m$  – число передаваемых по оптическому волокну разрядов, соответствующих  $n$ ;

$B$  – двоичное основание системы исчисления.

Перечисленным выше требованиям наиболее всего соответствуют коды СМІ, Миллера и VIF. На первичной ступени иерархии ВОСП целесообразно использовать код СМІ, для вторичной – СМІ и VIF, для третичной – VIF и Миллера, для более высоких – Миллера. Код HDB3 используется в ВОСП как стыковой код.

В современных ВОЛС, предназначенных для передачи цифровой информации E1, E2, E3, применяется преобразование кода HDB3 в код СМІ, который не содержит постоянной составляющей и по всем остальным параметрам оптимизирован для передачи по оптическому тракту. Однако эти достоинства достигаются ценой двухкратного увеличения тактовой частоты. В более скоростных системах E4 применяются линейные коды типа 5B6B, 10B1P1R.

Таблица 2 - Характеристики кодов, применяемых в ВОСП

Наименование кода	Обозначение	Описание	Вид	Применение	
Скремблированный код	NRZ Non Return to Zero	Без возврата к нулю на тактовом интервале		Является первым стандартным кодом линейного кодирования для цифровых ВОСП	
Безизбыточные коды	NRZ-L	Относительные коды	Точно повторяет информационную последовательность	Не получили широкого распространения из-за несоответствия требованиям к линейным кодам	
	NRZ-S NRZ-M		Изменяют состояние в последовательности после логического нуля S или логической единицы M		
Линейные коды класса 1B2B	BIF	BI-L	Би импульсный абсолютный	Один бит исходного сигнала преобразуется в комбинацию из двух бит	Длительность битов в 2 раза меньше преобразуемого, следовательно скорость передачи становится в 2 раза больше. Используется в низкоскоростных ВОСП
		BI-M	Би импульсный относительный M (1)		
		BI-S	Биимпульсный относительный S (0)		
	CMI	C инверсией группы символов	Длинные серии нулей заменяются вставками вида OOOV VOOV	Отсутствие длинных серий нулей обеспечивает устойчивый тактовый синхронизм	
MСMI	Модифицированный CMI				
Линейные коды класса mBnB	2B3B 3B4B 5B6B 7B8B	Блочные коды	Последовательность исходного сигнала разбивается на блоки, состоящие из m бит. Эти блоки преобразуются в определенную последовательность символов	Увеличивается скорость передачи $F = \frac{n}{m}$ Применяются в среднескоростных ВОСП	

Линейные коды вида mB1C	3B1C 8B1C	Коды со вставками Бит R используется для служебной связи	Исходная последовательность разбивается на блоки из m символов. К этим блокам	Применяются в высокоскоростных ВОСП
mB1P	10B1P 17B1P	Бит P – дополнительный служебный символ (если число единиц в блоке m нечетное, то символ P принимает значение «1», а если нечетное, то «0»)	присоединяются дополнительные служебные символы.	
mB1P1R	10B1P1R			

## Лекция 8. Современные технологии и аппаратура оптической системы связи

Цель лекции: ознакомиться с современными технологиями.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили две технологии временного мультиплексирования ОСС: синхронная цифровая иерархия SDH и технологии волнового мультиплексирования DWDM. Плездохронная цифровая иерархия PDH постепенно выходит из обращения в связи с несовершенством технологии.

Опишем, по мере их создания, представленные технологии. Европейская система PDH на первом уровне мультиплексора использует в качестве входных сигналов 30 каналов ОЦК (каналов нулевого уровня) и формирует первичный цифровой информационный поток со скоростью передачи  $30 \times 64 \text{ кбит/с} = 1920 \text{ кбит/с}$ . Для осуществления синхронизации, сигнализации и контроля ошибок к нему добавляются еще два канала ОЦК, в результате чего первичный цифровой канал (ПЦК) имеет скорость  $2048 \text{ кбит/с} = 2,048 \text{ Мбит/с}$  (или приблизительно 2 Мбит/с). Далее в схеме последовательного каскадного мультиплексирования, использующей мультиплексоры типа 4:1, можно сформировать цифровые каналы 2-го, 3-го, 4-го и 5-го уровней иерархии со скоростями передачи 8,448; 34,368; 139,264; 564,992 Мбит/с (или приблизительно 8; 34; 140; 565 Мбит/с). Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 30, 120, 480, 1920 и 7680 каналов ОЦК\*. В странах Европы и Латинской Америки она получила обозначение E1 (ПЦК), E2, E3, E4 и E5.

Технология PDH первоначально использовалась в медных кабелях, а затем получила широкое применение в ОК различного назначения. Сигналы ПЦК (сигналы первичной МСП) экономически нецелесообразно передавать даже по многомодовому ОВ, поэтому в ОСС различного назначения в

оконечной аппаратуре применяются МСП более высоких уровней иерархии. У нас в стране разработана соответствующая аппаратура ОСС с использованием многомодового градиентного и одномодового ОВ. Для формирования группового электрического цифрового сигнала используется двуполярный код HDB3 (стыковой код), а для передачи цифровой информации по оптическому линейному тракту — преобразование кода HDB3 в однополярные линейные коды, оптимизированные для ВОСП. В системах передачи уровня E2 это, как правило, коды 1B2B (СМ1 и МСМ1), в системах E3 и E4 — коды 5B6B, 10B1P1R и др.

В настоящее время промышленность выпускает аппаратуру систем передачи уровней E2 и E3 на современном технологическом уровне с использованием оптоэлектронных и электронных компонентов, обладающих высокой надежностью. Для создания межузловых и межстанционных связей на сетях интегрального обслуживания — это аппаратура ОЛТ-25 (ОАО «Морион», г. Пермь) и Т-41 (АО НПП «РОТЕК», Москва). Она позволяет передавать по одномодовому ОВ при  $A = 1,3$  мкм 120 каналов ОЦК. Энергетический потенциал составляет 40...42 дБ, а динамический диапазон приемного устройства — не менее 20 дБ.

Применяемые у нас в стране и за рубежом плездохронные системы позволяют осуществлять высококачественную многоканальную связь.

Но, по мере роста скоростей передачи, все больше проявляются недостатки технологии PDH. Их суть в общих чертах в следующем.

Во-первых, общая схема ВОСП даже при простой топологии «точка-точка», но при высоких скоростях должна содержать 3-4 уровня мультиплексирования/демультиплексирования на конечных станциях (передающей и приемной), что приводит к достаточно сложной аппаратурной реализации таких систем.

Во-вторых, невозможен вывод (или ввод) каналов ОЦК или E1 из каналов высших уровней иерархии без полного демультиплексирования и последующего мультиплексирования последних. И, в-третьих, возникают значительные трудности в организации служебных каналов для целей контроля и управления информационными потоками в сетях. Это означает, что в рамках технологии PDH невозможно создание современных цифровых сетей с гибкой, легко управляемой структурой.

Все это явилось предпосылкой преобразования технологии PDH в технологию синхронной цифровой иерархии SDH, которая не имеет указанных выше недостатков.

## **Лекция 9. Синхронные цифровые сети на основе технологии SDH**

Цель лекции: рассмотреть современную технологию синхронной цифровой иерархии.

Синхронная цифровая иерархия (SDH) — технология широкополосных транспортных сетей, которые являются инфраструктурой для подключения пользователя к широкому спектру услуг. Сети SDH позволяют передавать, информационные потоки на скоростях до 10 Гбит/сек, предоставляют широкий диапазон скоростей доступа, в том числе совместимых с плезиохронной цифровой иерархией, прозрачны для трафика любой природы (голос, данные, видео). Заложенная в структуру SDH сигнала служебная информация обеспечивает возможность централизованного управления сетевыми устройствами и сетью в целом, позволяя гибко и оперативно обслуживать сеть и предоставлять пользователям необходимые потоки, а также реализует механизмы защиты информационных потоков в сети от возможных аварий.

#### *Модель SDH.*

Телекоммуникационные технологии обычно объясняют, используя так называемую многоуровневую модель. SDH может быть также представлена в виде транспортных сетевых уровней, которые напрямую соотносятся к топологии сети (рисунок 20).

Самый низкий — физический уровень, представляющий передающую среду.

Секционный уровень отвечает за сборку синхронных модулей STM-N и транспортировку их между элементами сети. Он подразделяется на регенераторную и мультиплексорную секции.

Маршрутный уровень отвечает за доставку сигналов, предоставляемых сетью для конечного пользователя (PDH, ATM и др.), и упакованных в полезной нагрузке STM-N. Согласно терминологии SDH, эти сигналы называют компонентными или трибутарными сигналами, а предоставляемые пользователю интерфейсы доступа к сети — трибутарными интерфейсами.

Передача сигнальной информации для каждого уровня в SDH осуществляется при помощи механизма заголовков. Каждый STM-N кадр имеет секционный заголовок SOH (Section OverHead), состоящий из двух частей: заголовка регенераторной секции RSOH (Regenerator Section OverHead) и мультиплексорной секции MSOH (Multiplex Section OverHead).

Для упаковки и транспортировки в STM-N трибутарных сигналов предложена технология виртуальных контейнеров. Виртуальный контейнер состоит из поля полезной нагрузки — контейнера, на которое отображается трибутарный сигнал, и маршрутного заголовка POH (Path OverHead), который указывает тип контейнера и служит для сбора статистики о прохождении контейнера по сети.

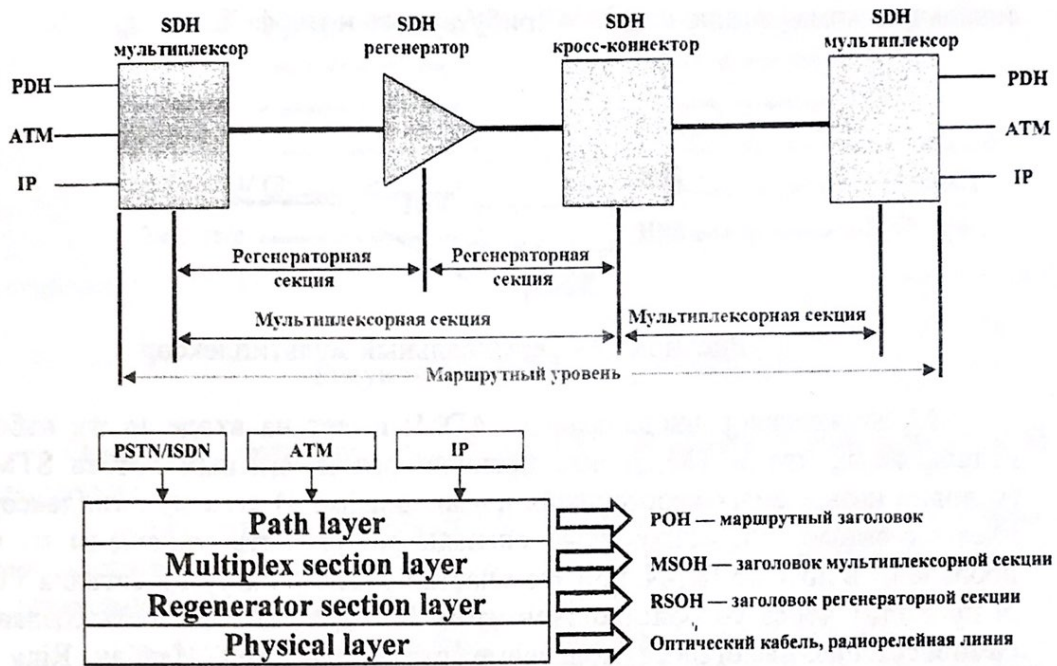


Рисунок 20 - Многоуровневая модель SDH

#### Базовые элементы сетей SDH.

Сети SDH строятся из четырех типов функциональных модулей (сетевых элементов): регенераторы, терминальные мультиплексоры, мультиплексоры ввода/вывода и кросс-коннекторы.

Регенератор используется для увеличения допустимого расстояния между узлами сети путем восстановления входящих сигналов SDH. Это расстояние зависит от степени затухания сигнала в передающей среде и параметров приемо-передающего оборудования. Для одномодового оптического кабеля оно составляет 15-40 км для длины волны 1310 нм и 40-110 км для 1550 нм.

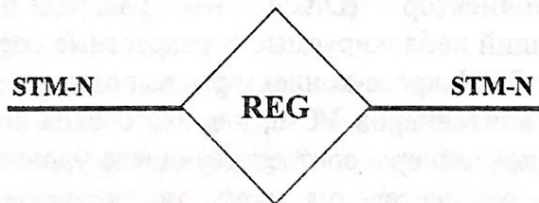


Рисунок 21 - Регенератор

Терминальный мультиплексор (ТМ) предназначен для мультиплексирования и демultipлексирования сигналов PDH и STM (в терминологии SDH их называют трибутарными или компонентными интерфейсами) в агрегатный поток STM-N. Он также может осуществлять

локальную коммутацию с одного трибутарного интерфейса на другой.

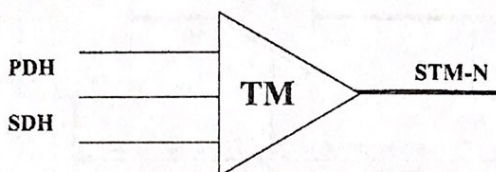


Рисунок 22 - Терминальный мультиплексор

Мультиплексор ввода/вывода (ADM) имеет на входе те же наборы интерфейсов, что и TM, и, как правило, два агрегатных потока STM-N (условно называемых «восточный» и «западный»). В этих мультиплексорах плезиохронные или синхронные сигналы могут быть извлечены из или добавлены в поток STM-N, при этом часть полезной нагрузки сигнала STM-N проходит через устройство транзитом. Это дает возможность создавать самовосстанавливающиеся кольцевые структуры (Self Healing Ring — SHR), которые, в случае аварии, автоматически коммутируют потоки в обход поврежденных участков или элементов сети.

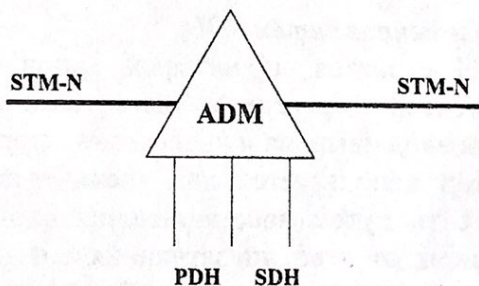


Рисунок 23 - Мультиплексор ввода/вывода

Кросс-коннектор (DXC) — распределительный узел сети, осуществляющий неблокируемые перекрестные соединения между любыми его портами. SDH кросс-коннекторы выполняют эти функции на уровне виртуальных контейнеров VC-n, для этого PDH сигналы отображаются на виртуальные контейнеры соответствующего уровня. Следует отметить, что возможность осуществления коммутации заложена также и в SDH мультиплексоры.



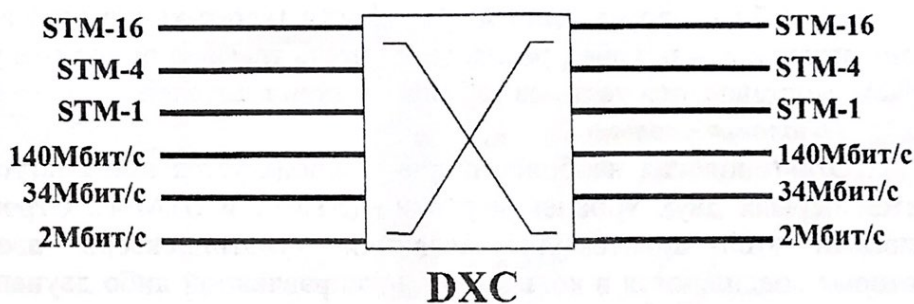


Рисунок 24 - SDH кросс-коннектор

Основные функции, выполняемые сетевыми элементами SDH следующие:

- маршрутизация виртуальных контейнеров, проводимая на основе использования информации в маршрутном заголовке POH соответствующего контейнера;
- консолидация или объединение виртуальных контейнеров;
- трансляция потока от точки к нескольким точкам (point-to-multipoint);
- сортировка или перегруппировка (grooming) виртуальных контейнеров, осуществляемая с целью создания нескольких упорядоченных, например, по типу переносимого сервиса, потоков;
- ввод/вывод виртуальных контейнеров.

#### *Топология сетей SDH.*

При построении сетей SDH одной из первых задач, которую необходимо решать, является задача выбора топологии. Рассмотрим набор базовых стандартных топологий, из комбинации которых может быть составлена сеть в целом.

#### *Топология «точка-точка».*

Это простейшая топология, включающая два терминальных мультиплексора, соединенных оптической линией связи с или без регенератора. Каждый из мультиплексоров действует как концентратор трибутарных потоков E1, E3 и др.

Эта топология широко используется при передаче больших потоков данных по высокоскоростным магистральным каналам. Она может быть реализована как по схеме без резервирования канала, так и по схеме со 100% резервированием типа 1+1, использующей основной и резервный агрегатные каналы.

#### *Топология «последовательная линейная цепь».*

Эта топология используется тогда, когда существует необходимость ответвлений в ряде точек линии, где могут вводиться и выводиться каналы доступа. Реализуется она путем включения вдоль линии связи мультиплексоров ввода/вывода.

#### *Топология «звезда».*

В этой топологии один из узлов сети (кросс-коннектор) играет роль концентратора (или хаба), распределяя часть трафика по другим удаленным узлам, а оставшуюся часть на терминалы пользователей.

*Топология «кольцо».*

Эта топология наиболее широко используется при построении SDH сетей первых двух уровней иерархии (STM-1 и STM-4). Строительными блоками этой архитектуры являются мультиплексоры ввода/вывода, которые соединяются в кольцо с однонаправленной либо двунаправленной передачей трафика.

Широкое использование кольцевой топологии обусловлено тем, что построенные на ее основе сети способны самовосстанавливаться после некоторых достаточно характерных типов отказов.

### **Лекция 10. Аппаратурная реализация функциональных блоков сетей SDH**

Цель лекции: изучить основные функциональные блоки сетей SDH.

Основным функциональным модулем сетей SDH является мультиплексор. Он выполняет как функцию мультиплексирования, так и функцию устройств терминального доступа, позволяя подключить стандартные каналы PDH иерархии непосредственно к своим входным портам, а также задачи коммутации, регенерации и концентрации.

Чтобы понять характеристики синхронных мультиплексоров и их внутреннюю структуру, рассмотрим блок-схемы ряда мультиплексоров и различных уровней.

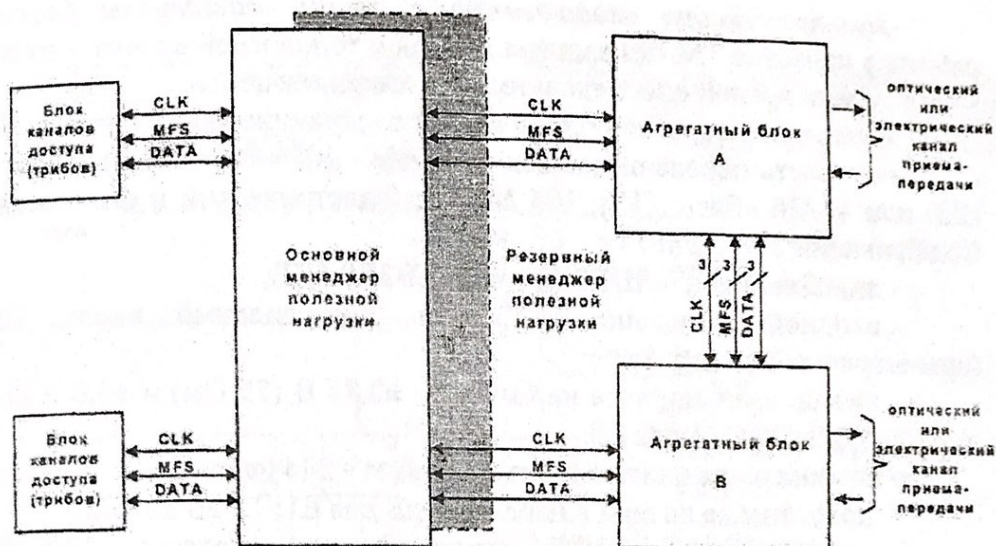
В настоящее время иерархия SDH содержит 5 синхронных уровней.

Таблица 4 - Уровни мультиплексоров

Модуль	Скорость передачи Мбит/с	Количество каналов ОЦК
STM-1	155,52 (155)	1920
STM-4	622,08 (622)	7680
STM-16	2488,32 (2,5 Гбит/с)	30720
STM-64	9953,28 (10 Гбит/с)	122880
STM-256	39813,12 (40 Гбит/с)	491520

#### Реализация мультиплексоров уровня STM -1

На рисунке 25 изображена функциональная схема синхронного мультиплексора STM-1.



CLK – хронизирующий сигнал, таймер;  
MFS - синхронизация мультифрейма;  
DATA – данные или поток данных.

Рисунок 25 - Блок-схема мультиплексора (уровень STM-1)

Мультиплексор смонтирован на стандартной стойке и состоит из следующих основных блоков:

- четырех *трибных* интерфейсных блоков с 16 электрическими портами 2 Мбит/с для ввода/вывода до 63 входных потоков;
- двух (основного и резервного) *менеджеров полезной нагрузки* - устройств для формирования и управления полезной нагрузкой (различные типы полезной нагрузки в виде VC-n, TU-n, TUG-2);
- двух *оптических или электрических агрегатных блоков* AU-4 А и В со 155 Мбит/с (STM-1) выходными портами «восток» и «запад» для формирования выходных потоков;
- двух (основного и резервного) блоков питания (на схеме не показаны);
- одного контроллера и локальной панели оператора (на схеме также не показаны);
- *терминального мультиплексора* ТМ с двумя агрегатными блоками, используемыми в режиме «основной/резервный» для создания защиты типа 1+1 агрегатных портов (по схеме 2-волоконного однонаправленного или двунаправленного кольца);
- *мультиплексора ввода/вывода* с двумя агрегатными блоками (портами «восток» и «запад») для работы в сетях с топологией «кольца» и защитой типа 1 + 1, создаваемой по схеме 2-волоконного двунаправленного кольца, или «последовательной линейной цепи»;

-мультиплексора ввода/вывода с одним агрегатным блоком для работы в качестве ТМ без защиты в сетях с топологией «точка – точка» или в сетях с топологией «последовательная линейная цепь».

Мультиплексор и его блоки имеют следующие характеристики:

- скорость передачи данных на входе - 2048 кбит/с (Е1); 34368 кбит/с (Е3) или 44736 кбит/с (Т3); 155 Мбит/с (электрический и оптический) для модификации TN-1X/4;

- линейный код - HDB3 (Е1 и Е3); В3ZS (Т3);

- входной импеданс - 75 Ом (коаксиальный вход), 120 Ом (симметричный вход);

- амплитуда импульса на выходе -  $\pm 2,37$  В (75 Ом) и  $\pm 3,0$  В (120 Ом) для Е1; 1,0 В (75 Ом) для Е3;

- номинальная длительность импульса - 244 нс;

- допустимые потери в кабеле - 6 дБ для Е1; 12 дБ для Е3;

- максимальные потери на отражение на входе/выходе - 14/8 дБ;

- соответствие стандартам - ITU-T Rec. G.703;

- тип секции: S-1.1 (1310 нм); L-1.1 (1310 нм); L-1.2 (1550 нм);

- выходная мощность: -13,5 -8 дБм ; -5 - 0 дБм (L-1.1); 1 - 2 дБм (L-1.2);

- чувствительность приемника (при коэффициенте ошибок  $10^{-10}$ ), дБм: -34,5 (S-1.1); -35,5 (L-1.1); -36 (L-1.2);

- максимально допустимые потери на секцию: 20 дБ (S-1.1); 29,5 дБ (L-1.1); 36 дБ (L-1.2);

- оптические потери ввода: 1 дБ;

- допустимая длина волны несущей: 1310 нм; 1550 нм;

- тип волокна оптического кабеля: одномодовое ОВ;

- соответствие стандартам - ITU-T Rec. G.957 (для STM-1).

*Электрические входы и выходы агрегатных блоков:*

- линейный код - СМI;

- входной импеданс - 75 Ом;

- допустимые потери на отражение на входе/выходе - 15 дБ;

- максимально допустимые потери в кабеле на входе - 12,7 дБ;

- амплитуда выходного импульса - 1,0 В;

- соответствие стандартам - ITU-T Rec. G.703.

*Мультиплексор уровня STM- 4/16.*

Представленная блок – схема мультиплексора уровня STM-4 позволяет легко модифицировать его до уровня STM-16. Структурная схема представлена на рисунке 26.

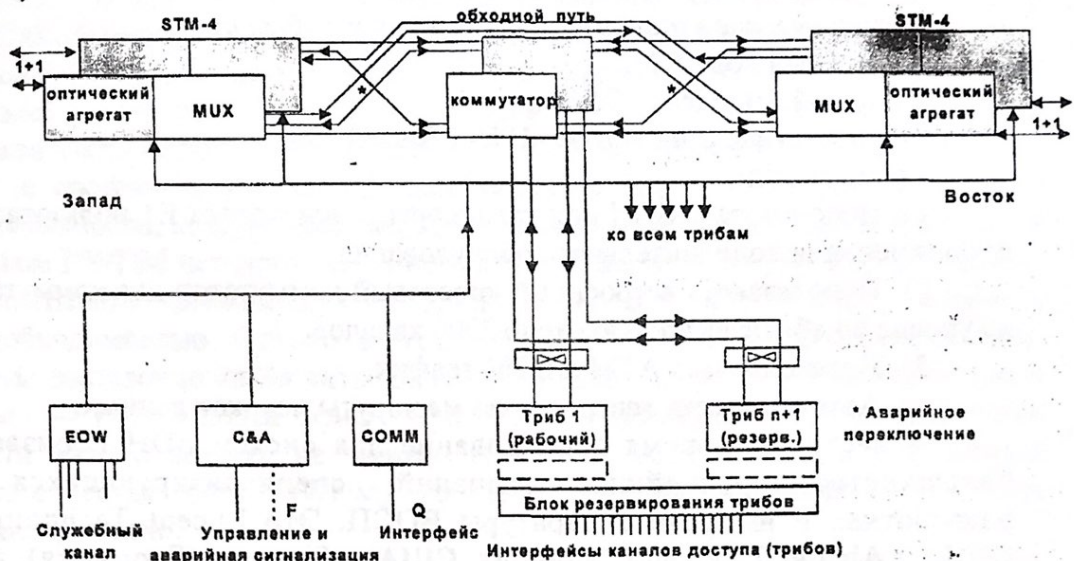


Рисунок 26 – Блок-схема мультиплексора STM-4/16

Мультиплексор смонтирован на двойной стандартной стойке и состоит из следующих основных блоков:

- *трибных* блоков с набором электронных портов для приема входных потоков различной скорости (2 до 155 Мбит/с);
- *двух пар* мультиплексоров и коммутаторов для мультиплексирования и управления потоками;
- *двух оптических агрегатных* блоков с выходными портами 622 Мбит/с «восток» и «запад» для формирования выходных потоков;
- *двух* (основного и резервного) блоков питания (на схеме не показаны);
- *интерфейсных* блоков контроля, управления и организации служебных каналов.

SMA 4 обеспечивает мультиплексирование в один или два потока 622 Мбит/с различных потоков, подаваемых на входные электрические порты трибных интерфейсов. Мультиплексор может быть использован для работы в качестве терминального мультиплексора, мультиплексора ввода/вывода, оптического концентратора и небольшого коммутатора.

Мультиплексор и его блоки имеют следующие характеристики:

- скорость передачи данных на входе – 2, 34, 45, 140 Мбит/с;
- линейный код - CMI;
- входной импеданс - 75 Ом (коаксиальный вход), 120 Ом (симметричный вход);
- максимально допустимые потери на секцию: 12 дБ (короткая секция); 24 дБ (длинная секция);
- допустимая длина волны несущей: 1310 нм; 1550 нм;

- тип волокна оптического кабеля: одномодовое ОВ.

*Электрические входы и выходы агрегатных блоков:*

- линейный код - СМІ;

- входной импеданс - 75 Ом;

- соответствие стандартам - ITU-T Rec. G.703.

Возможности:

1) Использовать SDH для транспортировки потока Е1 пользователю без применения дополнительного оборудования.

2) Использовать встроенный кроссовый коммутатор для коммутации на уровне 64 кбит/с емкостью около 2000 каналов.

3) Интегрировать АТМ и DТМ трафик.

4) Автоматически генерировать маршруты потоков данных.

В настоящее время оборудование для систем SDH производят большинство крупнейших компаний, специализирующихся на разработках и выпуске аппаратуры ВОСП. Это Lucent Technologies (США,) Alcatel Telecom (Германия, США), Siemens (Германия), NEC (Япония), Морион (Россия, г.Пермь).

### **Лекция 11. Спектральное уплотнение**

Цель лекции: рассмотреть технологию селективного спектрального уплотнения.

Selective WDM — селективное спектральное уплотнение — уникальная технология Lucent, компромисс между SDH и DWDM. Одни и те же узлы одного и того же волоконно-оптического кольца поддерживают и одноканальную передачу данных на длине волны 1310 нм, и спектральное уплотнение в диапазоне 1550 нм.

Преимущества SWDM особенно наглядно видны при сравнении с быстрорастущей сетью SDH. В начале, когда требуемая пропускная способность невелика, применение SDH кажется оправданным, и полосы для передачи на длине волны 1310 нм, позволяющей развернуть недорогое решение, достаточно. Но когда потребность в пропускной способности резко возрастает, наращивание системы возможно только за счет прокладки новых волоконных кабелей и подключения их к новым устройствам.

В то же время устройствам SWDM, наследующим свойства DWDM, не нужны новые кабели: все наращивание заключается во «включении» еще одной длины волны, для чего может, самое большее, потребоваться подключить еще один модуль в существующее устройство. Но это преимущество не единственное, а в некоторых случаях и не главное: иногда не менее важно, что не происходит усложнения топологии сети, не ухудшается ее управляемость и время, необходимое для наращивания, меньше, чем в случае с системами SDH.

Например, в сети типичного поставщика коммуникационных услуг

имеется оптоволоконное кольцо, соединяющее разбросанные по городу офисы с центральным офисом. Поставщик услуг планирует предоставить своим заказчикам доступ в сеть по технологии xDSL. Он рассчитывает на резкое увеличение трафика, но предсказать его количественно и оценить, какая часть кольца будет испытывать наибольшую нагрузку, оператор пока не в состоянии. На первой фазе развития сети его вполне устраивают возможности, которые дает передача данных на длине волны 1310 нм и ни о каком DWDM нет речи. Через некоторое время один из узлов сети начинает испытывать повышенную нагрузку. Переход к DWDM становится необходимостью. Однако в этом случае не нужно модернизировать всю сеть: достаточно «включить» одну длину волны на участке «перегруженный узел — центральный офис». При этом в конфигурации остальных узлов сети ничего менять не нужно. В случае, если бы была установлена классическая сеть DWDM, то пришлось бы наращивать всю сеть одновременно.

Не исключено, что в результате роста числа пользователей сети потребуются, в конце концов, перевести всю сеть на DWDM. Как, впрочем, возможна и ситуация, когда DWDM может так и не понадобиться, и поставщику услуг не придется тратить немалые средства для внедрения этой технологии. В любом случае, гибкость решения на базе SWDM не предоставит возможности сожалеть о вложенных или не вложенных средствах.

#### *Сравнение DWDM с SWDM.*

Исторически первыми возникли двухволновые WDM системы, работающие на центральных длинах волн их второго и третьего окон прозрачности кварцевого волокна (1310 и 1550 нм). Главным достоинством таких систем является то, что из-за большого спектрального разнеса полностью отсутствует влияние каналов друг на друга. Это способ позволяет либо удвоить скорость передачи по одному оптическому волокну, либо организовать дуплексную связь.

Современные WDM системы на основе стандартного частотного плана (ITU-T Rec. G.692) можно подразделить на три группы:

- грубые WDM (Coarse WDM – CWDM) – системы с частотным разнесом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов;

- плотные WDM (Dense WDM – DWDM) – системы с разнесом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 32 каналов;

- высокоплотные WDM (High Dense WDM – HDWDM) – системы с разнесом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

Частотный план для CWDM систем определяется стандартом ITU G.694.2. Область применения технологии CWDM – городские сети с расстоянием до 50 км. Достоинством этого вида WDM систем является

низкая (по сравнению с остальными типами) стоимость оборудования, вследствие меньших требований к компонентам.

## Лекция 12. Основы технологии WDM

Цель лекции: рассмотреть технологии полностью оптических сетей.

Оптическое мультиплексирование с разделением по длинам волн МРДВ (WDM) – сравнительно новая технология оптического (или спектрального) уплотнения, которая была разработана в 1970-1980 годах. В настоящее время WDM играет для оптических синхронных систем ту же роль, что и мультиплексирование с частотным разделением МЧР (FDM) для аналоговых систем передачи данных. По этой причине системы с WDM часто называют системами оптического мультиплексирования с частотным разделением ОМЧР (OFDM). Однако, по сути своей, эти технологии (FDM и OFDM) существенно отличаются друг от друга. Их отличие состоит не только в использовании оптического (OFDM) или электрического (FDM) сигнала. При FDM используется механизм АМ модуляции с одной боковой полосой (ОБП) и выбранной системой поднесущих, модулирующий сигнал которых одинаков по структуре, так как представлен набором стандартных каналов ТЧ. При OFDM механизм модуляции, необходимый в FDM для сдвига несущих, вообще не используется: несущие генерируются отдельными источниками (лазерами), сигналы которых просто объединяются мультиплексором в единый многочастотный сигнал. Каждая его составляющая (несущая) принципиально может передавать поток цифровых сигналов, сформированный по законам различных синхронных технологий. Например, одна несущая формально может передавать АТМ трафик, другая SDH, третья PDH и т.д. Для этого несущие модулируются цифровым сигналом в соответствии с передаваемым трафиком.

Основная схема системы с WDM (для примера взято четыре канала) имеет вид, представленный на рисунк 27 (показан один прямой канал).



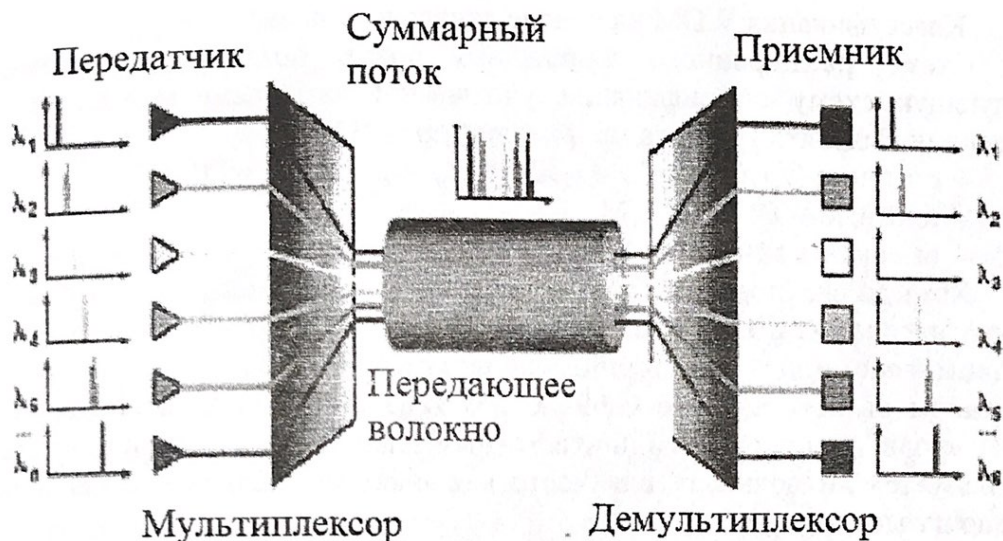


Рисунок 27 - Блок-схема системы, использующей WDM

Здесь  $n$  входных потоков данных (кодированных цифровых импульсных последовательностей) модулируют (модуляция основной полосой) с помощью оптических модуляторов  $M_i$  оптические несущие с длинами волн  $\lambda_i$ . Модулированные несущие мультиплексируются (объединяются) с помощью мультиплексора WDM  $M_{\text{mux}}$  в агрегатный поток, который после усиления (с помощью бустера или мощного усилителя – МУ) подается в ОВ. На приемном конце поток с выхода ОВ усиливается предварительным усилителем – ПУ, демultipлексируется, т.е. разделяется на составляющие потоки – модулированные несущие  $\lambda_i$ , которые детектируются с помощью детекторов  $D_i$  (на входе которых могут дополнительно использоваться полосовые фильтры  $\Phi_i$  для уменьшения переходных помех и увеличения тем самым помехоустойчивости детектирования), и, наконец, демодулируются демодуляторами  $DM_i$ , формирующими на выходе исходные кодированные цифровые импульсные последовательности. Кроме МУ и ПУ, в системе могут быть использованы и линейные усилители – ЛУ (как рассматривалось выше).

Таблица 5- Практика использования стандартного канального плана

Компания	Alcatel	Bellcore	Lucent	MCI	Nortel
Шаг, ТГц	0,2; 0,1	0,2	0,1	0,4; 0,1	0,1
Начало плана S	1531,90	н/д	н/д	1530,33	1528,77
Конец плана S	1542,94	н/д	н/д	1541,35	1539,77
Начало плана L	1547,72	1547,72	1550,12	1549,32	н/д
Конец плана L	1558,98	1558,98	1560,61	1560,61	н/д
Число каналов	8L; 16S; 32-40SL	8L	16L	4L; 8S	8S

Классификация WDM на основе канального плана.

Схема расширенного канального плана позволяет предложить следующую схему классификации, учитывающую современные взгляды и тенденции выделять три типа мультиплексоров WDM:

- обычные (грубые) WDM (CDWM), или просто WDM;
- плотные WDM (DWDM);
- высокоплотные WDM (HDWDM).

Хотя до сих пор и нет точных границ деления между этими типами, можно предложить, вслед за специалистами компании Alcatel, некоторые границы, основанные на исторической практике разработки систем WDM и указанном выше стандарте G.692 с его канальным планом, называемым также «волновым планом» или «частотным планом» в зависимости от того, используется ли волновая или частотная шкала канального плана. Итак, можно называть:

- системами WDM – системы с частотным разносом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов;
- системами DWDM – системы с разносом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 64 каналов;
- системами HDWDM – системы с разносом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.

### **Лекция 13. Схемы реализации мультиплексоров WDM**

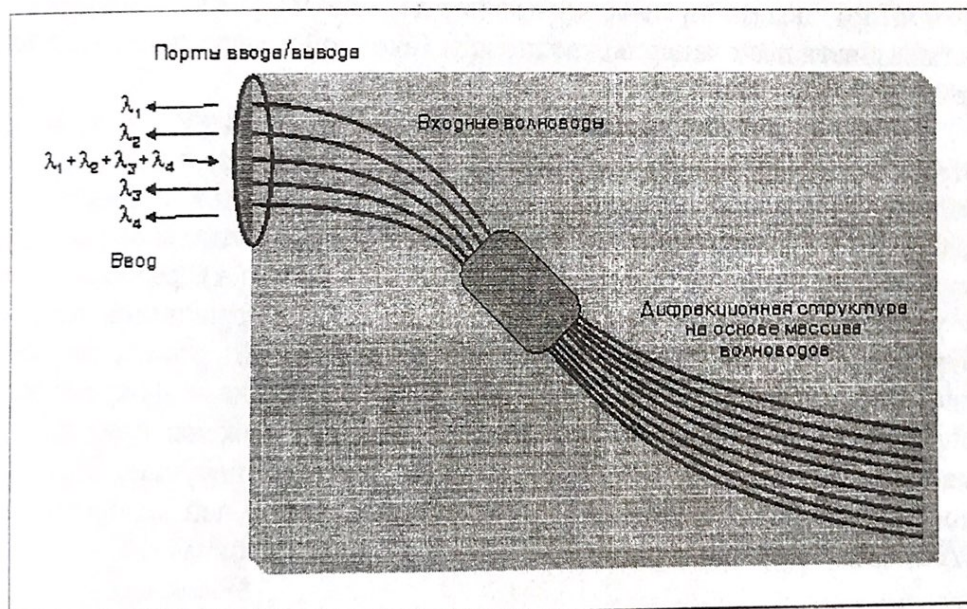
Цель лекции: рассмотреть основные схемы мультиплексоров.

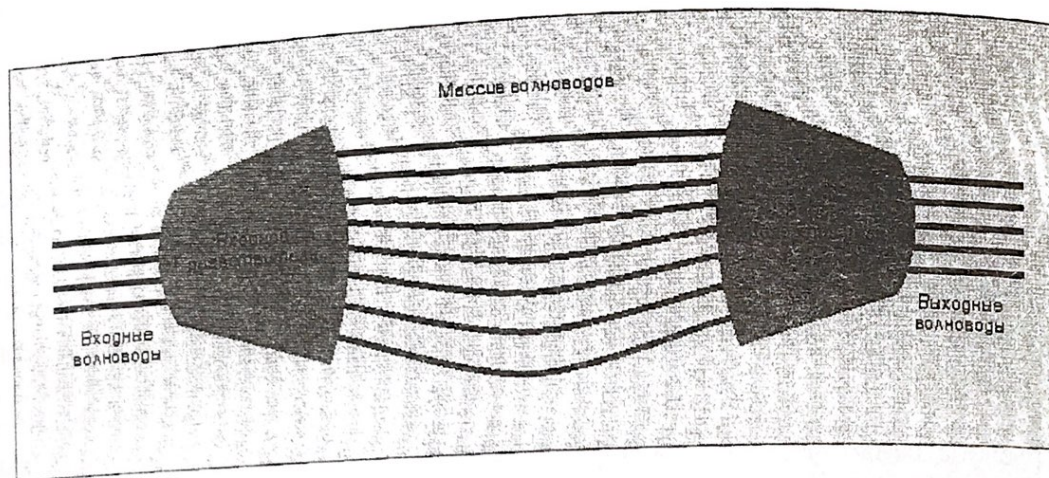
Первые мультиплексоры класса WDM, как известно, использовались для мультиплексирования двух несущих: 1310 нм и 1550 нм, расстояние между которыми 240 нм было настолько большим, что при реализации не требовало специальных фильтров для их разделения. Дальнейшие усилия, направленные на улучшение селективности (уменьшение разноса каналов) при использовании традиционной дискретной оптики, не давали результатов лучше, чем следующие:

- разнос каналов – 20-30 нм;
- переходное затухание между каналами – 20 дБ;
- уровень вносимых потерь – 2-4 дБ.

В настоящее время используются три конкурирующие технологии выделения каналов (демультиплексирования). Две из них на основе интегральной оптики: одна использует выделение несущих на основе дифракционной решетки на массиве волноводов – AWG (Arrayed Waveguide Grating) и вторая на основе вогнутой дифракционной решетки – CG (Concave Grating). В третьей технологии применяется традиционная миниатюрная (на новом уровне технологии) дискретная оптика, использующая выделение каналов на основе технологии трехмерного оптического мультиплексирования – 3DO (3-D Optics WDM).

В основе первой из них планарный оптический многопортовый разветвитель в форме таблетки с портом входа  $l_0$  и группой выходных портов  $l_1^0, l_2^0, \dots, l_n^0$ , расположенной симметрично относительно  $l_0$  на периферии волновода слева, и группой внутренних выходных портов  $l_{1i}, l_{2i}, \dots, l_{ni}$ , расположенной симметрично группе выходных портов на периферии справа. Внутренние выходные порты соединены через массив световодов (играющий роль дифракционной решетки, благодаря фиксированной разнице длин каждого световода, кратной  $D L$ ) с плоским отражающим зеркалом. Входной поток  $l_0 = S l_i (i=1, 2, \dots, n)$  подается в оптический волновод и распределяется по всем внутренним портам, откуда он распространяется по массиву световодов (с разным фазовым запаздыванием) до зеркала, отражается и подается со стороны внутренних выходных портов в тот же волновод, где происходит интерференция входной и отраженных волн. Указанное устройство напоминает, по сути, интерференционный волновой фильтр на дифракционной решетке или многомерный вариант MZI. Размеры и форма планарного разветвителя, решетки световодов, а также расположение выходных портов выбираются так, чтобы интерференционные максимумы освещенности располагались в районе выходных портов и соответствовали группе несущих  $l_1^0, l_2^0, \dots, l_n^0$ .





- а) с одним разветвителем и отражающим зеркалом;
- б) с входным и выходным разветвителями.

Рисунок 28 - Схема мультиплексирования WDM на основе дифракционной решетки на массиве волноводов

Порт входа и выходные порты могут быть разнесены, если использовать два планарных волновода (входной и выходной разветвители), как это показано на рисунок 28.

Третья технология также использует классическую схему с плоской отражательной дифракционной решеткой, вогнутым зеркалом и массивом волокон (рисунок 29), размещенных в пазах решетки с фиксированным шагом. Схема работы (в режиме демультиплексора) проста: мультиплексированный поток из входного волокна (А), расходясь конусом с углом, (отражается от зеркала и падает на дифракционную решетку) отражающую под разными углами свет разной длины волны. Эти дифрагированные лучи, отражаясь от зеркала, фокусируются в определенных точках, где и должны быть расположены приемные порты массива волокон, выделяющих соответствующие несущие. Для примера показано выделение одного такого канала, конус лучей которого с тем же углом фокусируется в точке В (порте выходного волокна).

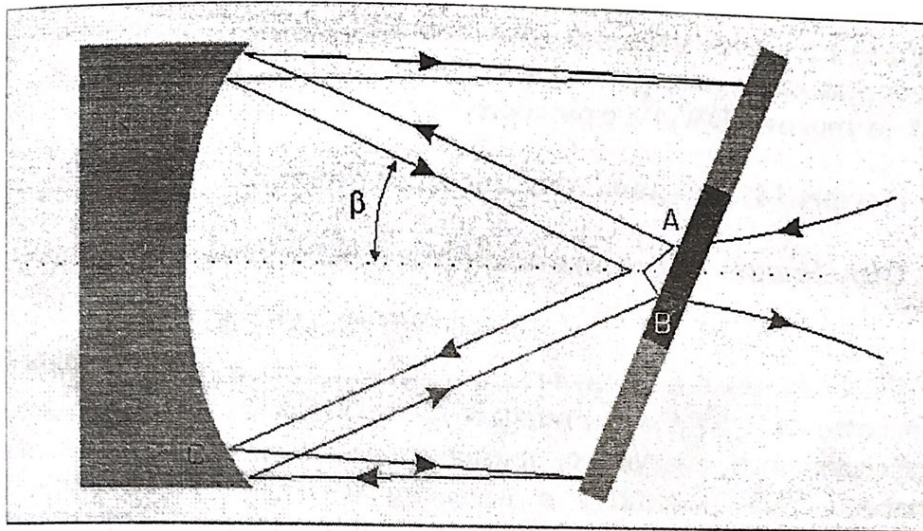


Рисунок 29 - Схема WDM на основе трехмерного оптического мультиплексирования

Все элементы конструкции строго фиксированы в стеклянном блоке, что позволяет выдержать и сохранять высокую точность изготовления (рисунок 29). Указанная конструкция может быть использована как с параболическим, так и сферическим зеркалами, имеет коэффициент увеличения, равный 1. Она афокальна (т.е. не имеет фокуса), так что все исходящие и входящие в волокна углы одинаковы. OM волокна укладываются в канавки специальной решетки. Конструкция позволяет использовать до 131 канала с шагом 1 нм или до 262 каналов с шагом 0,5 нм.

Во всех указанных решениях процедура мультиплексирования предполагается обратной по отношению к рассмотренной процедуре демультиплексирования. Параметры мультиплексов WDM, реализованных на основе указанных технологий, сведены в таблицу, приведенную ниже.

Таблица 6 - Сравнение различных технологий оптического мультиплексирования

Технология	Максимальное число каналов [нм]	Разнос каналов	Вносимые потери [дБ]	Переходное затухание [дБ]	Чувствительность к поляризации, %
I/O AWG	32	0,1 – 15	6 – 8	-5 – -29	2
I/O CG	78	1 – 4	10 – 16	-7 – -30	2 – 50
3-D Optics WDM	262	0,4 – 250	2 – 6	-30 – -55	0

Из таблицы 6 видно, что технология 3-D Optics WDM имеет преимущество по четырем из пяти параметров и может быть использована в системах WDM до уровня HDWDM с разносом каналов не меньше 0,4 нм.

#### Лекция 14. Пассивные оптические сети

Цель лекции: рассмотреть принцип работы пассивных оптических сетей.

PON (пассивные оптические сети) — это семейство быстро развивающихся, перспективных технологий широкополосного мультисервисного доступа с применением оптического волокна. Суть технологии PON находится в названии и заключается в том, что ее распределительная сеть монтируется без использования активных компонентов: деление оптического сигнала в одноволоконной оптической линии связи осуществляется с помощью пассивных разветвителей оптической мощности — сплиттеров [1].

Главные элементы сети:

- центральный узел OLT (Optical line Terminal) – устройство, стоящее в головном офисе: оно набирает информацию со стороны магистральных сетей через интерфейсы SNI (service node inTerfaces) и образует прямой поток к абонентским узлам по топологии дерево PON;

- абонентский узел ONT (Optical network Terminal) имеет, пользовательские интерфейсы и интерфейсы для подключения к дереву PON;

- передатчик осуществляет работу на длине волны 1310 нм, а приемник информации – на длине волны 1550 нм. ONT принимает данные от OLT, преобразовывает их и передает абонентам через пользовательские интерфейсы UNI (user network inTerfaces);

- оптический делитель – это пассивный оптический элемент многополюсник, делящий поток оптического сигнала в одном направлении и объединяющий потоки в обратном направлении. У делителя может быть M входных и N выходных портов. В сетях PON в основном используют разветвители 1хn с одним входом. Разветвители 2хn т используются в системе с резервированием по одному волокну.

Идея топологии PON - это использование всего одного приемопередающего модуля в головном узле OLT для передачи данных любым абонентским устройствам ONT и приема данных от них.

Каждая пассивная оптическая сеть имеет три главных элемента: стационарный терминал OLT, пассивные оптические сплиттеры и абонентский терминал ONT. Терминал OLT дает взаимодействие сети PON с внешними сетями, сплиттеры осуществляют деление оптического сигнала на любом участке оптического тракта сети PON, а ONT имеет нужные интерфейсы взаимодействия с абонентской стороной. На основе

архитектуры PON создаются решения с применением логической топологии «Point-To-mulTiPoint». К одному из портов центрального узла можно подсоединить целый волоконно-оптический тракт древовидной архитектуры, объединяющий сотни пользователей. При этом пассивные оптические сплиттеры устанавливаются в муфтах на промежуточных узлах магистрали и не требуют электропитания и обслуживания [1].

Общая схема подключения компонентов сети представлена на рисунке 30.

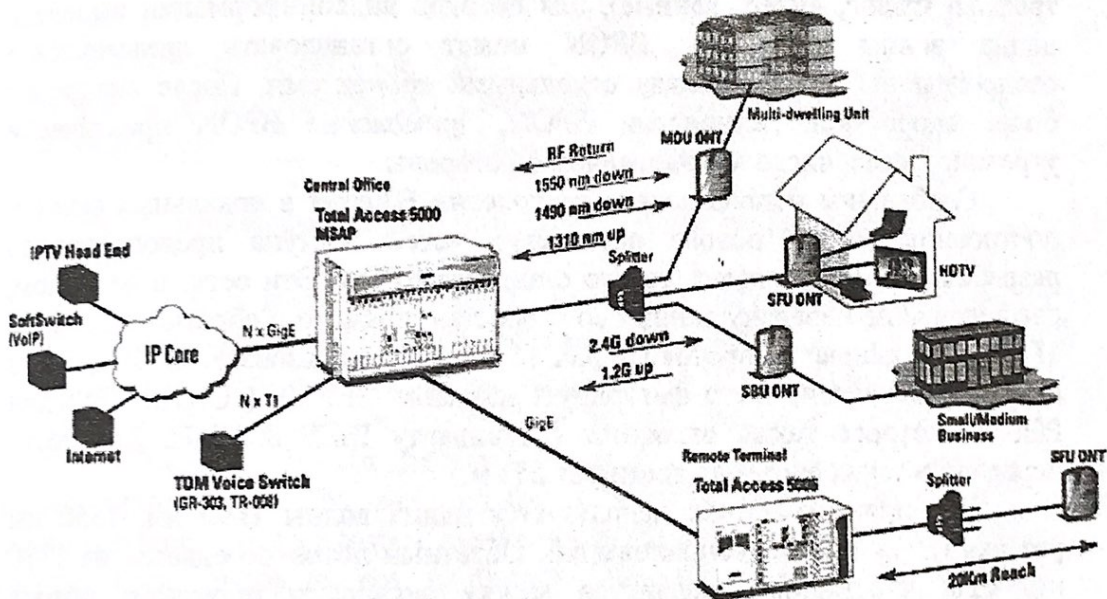


Рисунок 30 - Обобщенная структура построения сети PON

В семействе PON существует несколько разновидностей, различающихся, в первую очередь, базовым протоколом передачи данных [2].

Таблица 7 - Разновидности технологии PON

Название	Стандарт (Рекомендация)
APON (ATM PON)	Рекомендации ITU-T G.983.x
BPON (Broadband PON)	Рекомендации ITU-T G.983.x
EPON (Ethernet PON)	Стандарты IEEE 802.3ah/ IEEE
GPON (Gigabit PON)	Рекомендации ITU-T G.984.x

Первая в середине 91-х годов была разработана технология APON, которая базировалась на передаче информации в ячейке структуры ATM со служебными данными. В этом варианте была скорость передачи прямого и обратного потоков по 155 Мбит/с (симметричный режим) или 622 Мбит/с в прямом потоке и 155 Мбит/с в обратном (асимметричный режим).

Для того что-бы не происходило наложение данных, поступающих от различных пользователей, OLT направляется на каждый ONU служебные сообщения с разрешением на передачу данных. В последнее время APON в своем изначальном виде практически не существует. Последующее совершенствование этой технологии привело к созданию нового стандарта – BPON. Здесь скорость прямого и обратного потоков доведена до 622 Мбит/с в симметричном режиме или 1244 Мбит/с и 622 Мбит /с в ассиметричном режиме [2].

Предусматривается возможность передачи трех главных типов трафика (голос, видео, данные), для потоков видеоинформации выделена длина волны 1550 нм. BPON может организовать динамическое распределение полосы между отдельными абонентами. После внедрения более скоростной технологии GPON, применение BPON практически утратило смысл чисто с экономической стороны.

Глобальное использование технологии Ethernet в локальных сетях и построение на их основе оптических сетей доступа предопределило разработку в 2000-х годах нового стандарта EPON. Эти сети, в основном, рассчитаны на передачу данных со скоростью прямого и обратного потоков 1Гбит/с на основе IP-протокола для 16 (или 32) пользователей. Исходя из скорости передачи, часто фигурирует название GEPON ( Gigabit Ethernet PON ), которое также относится к стандарту IEEE 802.3aH. Дальность передачи в таких системах достигает 25 км.

Для прямого потока используется длина волны 1490 нм, 1550 нм резервируется для видеоприложений. Обратный поток передается на 1310 нм. Для избежания конфликтов между сигналами обратного потока применяется специальный протокол управления множеством узлов (Multi-Point Control Protocol, MPCP). В GEPON поддерживается операция обмена информацией между потребителями (bridging).

Для главных поставщиков, строящих большие разветвленные сети с системами резервирования, наиболее удачной считается технология GPON, которая наследует линейку APON- BPON, но с более высокой скоростью передачи -1244 Мбит/с и 2488 Мбит/с (в ассиметричном режиме) и 1244 Мбит/с (в симметричном режиме).

За основу был взят базовый протокол SDH (а точнее протокол GFP). Возможно подключение до 32 (или 64) пользователей на расстоянии 25 км (с возможностью расширения до 65 км). GPON поддерживает как трафик ATM, так и IP, речь и видео ( кадры GEM - GPON Encapsulated Method), а также SDH. Вся сеть работает в синхронном режиме с постоянной длительностью кадра. Линейный код NRZ со скремблированием обеспечивают высокую эффективность полосы пропускания.