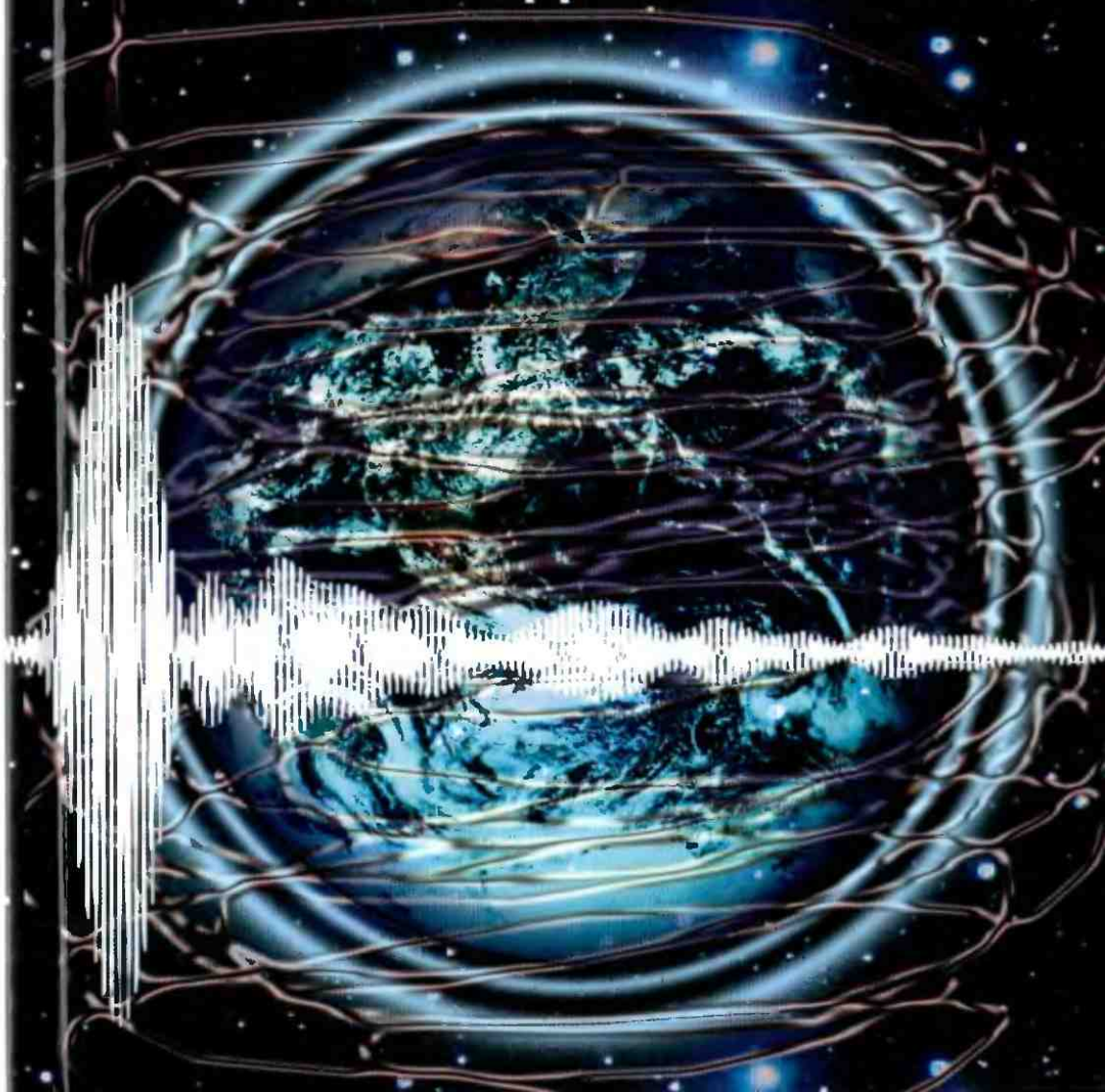


МИР СВЯЗИ

И. ШАХНОВИЧ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ





М И Р С В Я З И

И. ШАХНОВИЧ

Современные технологии беспроводной связи

Издание второе,
исправленное
и дополненное

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2006

И. В. Шахнович

Современные технологии беспроводной связи

Издание второе, исправленное и дополненное

Москва:

Техносфера, 2006. - 288с. ISBN 5-94836-070-9

В монографии описаны современные технологии беспроводной радиосвязи, принципы построения логической и физической структуры беспроводных сетей передачи информации. Описываются персональные беспроводные сети с технологиями Bluetooth, ZigBee, IEEE 802.15.1, 3/3a, локальные беспроводные сети (стандарты IEEE 802.11 a/b/g и DECT), региональные сети стандарта широкополосного вещания IEEE 802.16. Рассказано о технологиях сотовой телефонии (GSM с расширениями GPRS и EDGE, CDMA, стандарты 3G) и транкинговых сетях, системах цифрового телевидения (DVB, ATSC) и радиовещания (DAB), а также о спутниковых системах связи. Описаны перспективные сверхширокополосные системы связи (UWB).

Книга предназначена для широкого круга читателей – разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех тех, кто интересуется современными технологиями связи.

© 2004, И. В. Шахнович

© 2006, И. В. Шахнович

© 2006, ЗАО "РИЦ "Техносфера",
оригинал-макет, оформление.

65-74-73-101-75-67

ISBN 5-94836070-9

Содержание

Введение	11
Глава 1	
Беспроводные сети передачи информации.	
История и основные понятия	14
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий.....	14
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей.....	23
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций	26
1.4. Модель взаимодействия открытых систем.....	30
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях..	32
Глава 2	
Спутниковые сети передачи информации.....	40
2.1. Исторический очерк развития спутниковой связи	40
2.2. Виды орбитальных группировок. Геостационарные орбиты	41
2.3. Эллиптические, средневысотные и низкие орбиты.....	43
2.4. Архитектура и основные принципы работы спутниковых систем связи	45
2.5. Методы множественного доступа в ССС.....	48
Глава 3	
Технологии транковой радиосвязи	52
3.1. Виды транковых сетей связи.....	53
3.2. Аналоговые транковые сети стандарта МРТ 1327	55
3.3. Цифровая система транковой связи ТЕТРА	56
3.3.1. Технические особенности системы ТЕТРА.....	58
3.3.2. Дополнительные услуги	63
3.3.3. Защита информации	64
Глава 4	
Цифровое телевидение.....	67
4.1. Краткий исторический экскурс	67
4.2. Системы цифрового телевидения.....	70
4.3. Стандарт АТSC	72
4.4. Стандарт DVB.....	75
4.5. Переход к цифровому телевизионному вещанию	81

Глава 5	
Цифровое радиовещание	84
5.1. Система Eureka-147	84
5.2. Технология ИВОС	94
5.3. Всемирное цифровое радио (DRM)	99
Глава 6	
Стандарт DECT	103
6.1. Назначение стандарта DECT	103
6.2. Принципы организации DECT	106
6.3. Защита от несанкционированного доступа	109
6.4. Системы DECT	110
6.5. Аппаратная реализация DECT-устройств	111
Глава 7	
Мобильные сотовые технологии	117
7.1. Аналоговые стандарты сотовой связи	118
7.2. Глобальная система мобильной связи GSM	119
7.3. Стандарт CDMA	122
7.4. Третье поколение сотовой связи	128
7.4.1. Основные технологии третьего поколения	128
7.4.2. Переходные технологии GPRS и EDGE (сети 2,5G) ...	132
7.5. Развитие сетей третьего поколения	135
Глава 8	
Технология сверхширокополосной связи	138
8.1. Терминология и краткая история	138
8.2. «Импульсное радио»	140
8.3. Сверхширокополосные системы — достоинства и проблемы ...	143
8.4. Особенности аппаратной реализации сверхширокополосных систем	146
Глава 9	
Персональные беспроводные сети	149
9.1. Стандарт Bluetooth	150
9.1.1. Стандарты Bluetooth и HomeRF	150
9.1.2. Появление и развитие Bluetooth	151
9.1.3. Архитектура и логическая структура сети Bluetooth ...	152
9.1.4. Интегральная элементная база для Bluetooth	161

9.2.	Высокоскоростные персональные сети стандарта IEEE 802.15.3.....	166
9.2.1.	Спецификация IEEE 802.15.3.....	166
9.2.2.	Сверхбыстродействующие персональные сети — проект IEEE 802.15.3а.....	171
9.2.3.	Технология MB-OFDM.....	172
9.2.4.	Технология DS-UWB.....	174
9.3.	Низкоскоростные сети стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee)	174

Глава 10

Беспроводные локальные сети стандартов

IEEE 802.11.....	180	
10.1.	Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	180
10.2.	Основные принципы IEEE 802.11.....	182
10.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	185
10.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.11b.....	189
10.5.	Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b.....	195
10.6.	Стандарт IEEE 802.11а.....	198
10.6.1.	Формирование OFDM-символов.....	198
10.6.2.	Структура пакетов физического уровня.....	203
10.7.	Стандарт IEEE 802.11g.....	206
10.8.	Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	213
10.9.	Проект стандарта IEEE 802.11n.....	216
10.10.	Отличия физического уровня.....	217
10.10.1.	Каналы и режимы передачи.....	217
10.10.2.	Формирование сигналов MIMO-OFDM.....	218
10.10.3.	Структура кадров физического уровня.....	222
10.10.4.	Особенности MAC-уровня.....	225
10.10.5.	Элементная база для 802.11n.....	229

Глава 11

Стандарт широкополосного доступа

IEEE 802.16-2004.....	233	
11.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16.....	233
11.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS.....	233
11.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004.....	235
11.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004.....	237
11.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	239
11.3.1.	Структура MAC-уровня.....	239

11.3.2. Соединения и сервисные потоки	241
11.3.3. Пакеты MAC-уровня	242
11.3.4. Общая структура кадров IEEE 802.16	244
11.3.5. Принцип предоставления канальных ресурсов	245
11.3.6. Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь	247
11.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC	249
11.4.1. Канальное кодирование	249
11.4.2. Структура кадров	251
11.5. Режим WirelessMAN-OFDM	255
11.5.1. Канальное кодирование	257
11.5.2. Структура кадров	261
11.5.3. Особенности запроса канальных ресурсов	262
11.5.4. Mesh-сеть	263
11.6. Режим OFDMA	267
11.6.1. Особенности формирования символов и канального кодирования	268
11.6.2. Структура кадров, методы распределения несущих ..	268
11.6.3. Нисходящий OFDMA-канал	270
11.6.4. Восходящий канал	273
11.6.5. Запрос полосы и регистрация в сети	275
11.7. Поддержка адаптивных антенных систем	276
11.7.1. Работа с направленными AAS	277
11.7.2. Пространственно-временное кодирование	279
11.8. Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16	281
Литература	284

Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонимы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это зияла одна щель. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 10-15 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX в. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного древа — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX в. в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (текст, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автостреды, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т.д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet (100/1000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от нетерпеливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, теле-

медицина, телеконференция, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезни сегодня сети связи — и ударит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI в. человечество начало вырваться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже вдвое больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов, и это только начало. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [6, 65, 33], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–10 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление персональных процессоров цифровой обработки сигнала. Интернет остался бы ARPANet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адаптеры и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

В главе 1 приведен исторический обзор развития систем беспроводной связи, классификация современных систем беспроводной связи, основные системы стандартов в этой области. Рассмотрена модель взаимодействия открытых систем. Кратко описаны основные методы доступа к среде в беспроводных сетях.

Главы со 2 по 7 посвящены различным системам беспроводной связи — спутниковой связи, транковым системам, сотовой связи [34, 35], цифровым телевидению и радиовещанию [37], системам беспроводной связи DECT [31]. В главе 8 изложены принципы сверхширокополосных систем связи [36].

В главах 9–11 подробно рассказано о стандартах комитета IEEE 802 в области персональных, локальных и региональных беспроводных сетей передачи информации. Глава 9 посвящена персональным беспроводным сетям (IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [17], IEEE 802.15.3, 3a и 4 (ZigBee) [41]). В главе 10 описаны локальные беспроводные сети передачи информации группы стандартов IEEE 802.11 [38, 39, 44] (стандарты IEEE 802.11 a/b/g и проект IEEE 802.11n). В главе 11 рассматривается перспективный стандарт региональных беспроводных сетей IEEE 802.16-2004. Приведено описание радиоинтерфейсов, методов модуляции и доступа к каналам, системы управления потоками, механизмов уровня управления доступом к каналу передачи (MAC-уровня) [40, 42, 43].

При описании технологий уделено внимание принципам построения аппаратуры и необходимой для этого элементной базы, приведены конкретные примеры. Рассмотрены вопросы модуляции, кодирования источника, схем доступа к каналу связи. Материал представлен в исторической ретроспективе, что показывает как устойчиво сохраняющиеся тенденции, так и динамику, перспективны и основные направления развития систем беспроводной связи. Для ряда особо значимых беспроводных технологий приведены примеры аппаратной реализации устройств, описаны их электронные компонентная база.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Книга предназначена для широкого круга читателей — разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

ГЛАВА I

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бризга Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтимором и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через четырнадцать лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволивший по одному проводу передавать до шести телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символичный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССПТ) Международный

алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Имелю он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять. В первых сетях начиная с 1880 г. этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Струоджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Струоджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых случаев электронного шпионажа, который так возмутил Струоджера, что заставил его изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Струоджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Струоджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М.Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденберга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая ве-

роятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М.Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером, С.М. Бердичевским-Апостоловым, разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предвыкателем, выбирающим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предвыкатель и его принцип свободного поиска стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Струуджера) началось массовое внедрение электро-механических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник. 1932ю Т. 39. № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения. 1962. Т. 7. Вып. 3.), выполнявший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквасер изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиogramм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все инвертирует — основополагающая теорема Клода Элюда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Labora-

tories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передаточной системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 50-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX в. Идея посылки в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Браули. В 1892 г. английский ученый Вильям Крук теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозных разрядов на основе когерера — стеклянной трубки, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубки резко возрастала. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А.С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозных разрядов («грозоуказчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А.С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиogramму, состоявшую из двух слов «Герц Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий Нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [69]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает

по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 20-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось 6 каналов пирингово по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля 1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Началась эра спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 60-е годы прошлого столетия и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 60-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (центр стратегических исследований ВВС США), и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» («Information Flow in

Large Communication Nets», 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» («On Distributed Communications»). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, унифицированных и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Данису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 70-х она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблом разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52-87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммута-

ции Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Вилдером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной отправки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Меткалф, до прихода в Xerox защитивший в MIT докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Меткалф совместно с Дэвидом Боггом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Меткалфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через

год. В том же 1979 г. Меткалф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. ССИТТ выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по выделенному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Массовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токорои и другой японский ученый, Кинчироу Тамару, предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км².

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долларов. В 1979 г. в Женеве ССИТТ утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 60-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеoinформации. Так, в области локальных сетей было соз-

дано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 70-80-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывались с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное провидение тех, кто в 60-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента IPTO в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 60-х он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ-интегральных схем). Вот эти

слагаемые и привели сегодня к тому, что высокоскоростные беспроводные СПИ готовы избавить мир от пут проводных коммуникаций.

1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критериев классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по мере развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеoinформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Практически все рассматриваемые нами технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и

обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. Обычно полагают, что если ширина спектральной полосы F , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы f_c , то система узкополосная (т.е. $F/f_c \ll 1$). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [30]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т.е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты. В нашем случае под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства, связанные с широкой рабочей полосой. Поэтому точный критерий не существует, да и невозможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи. Технологически его никак нельзя «зафиксировать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т.п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замене кабелей системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на рассто-

янии до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т.п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транковые системы. Недавно появилось семейство стандартов на широкополосные беспроводные сети городского масштаба IEEE 802.16. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеоинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду не отличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно продемонстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить нереально. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов

(даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеoinформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером является появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета).

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготовителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный телекоммуникационный союз (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его секто-

ра вобрали в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного телекоммуникационного союза ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D, был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась 140 (!) лет назад, 17 мая 1865 г., в Париже, когда представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 20-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупней-

ших в практике реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что современная структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций: тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), вливающийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электротехники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association) в Великобритании —

Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позитивный век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Уси-

лиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в текном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

Физический уровень предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

Сетевой уровень (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

Транспортный уровень (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

Основное назначение сеансового уровня (Session) — организация, поддержание и окончание сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления (Presentation). Цель уровня представления — преобразование данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд. Прикладной уровень (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link

Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

Множественный доступ с пространственным разделением основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах **множественного доступа с частотным разделением** (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволя-

ет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно скудных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является **множественный доступ с временным разделением** (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов E1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки \times 8 кГц частоты выборки). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных — $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$ (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по мультиплексным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с **кодовым разделением** (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, WCDMA и др.). В дан-

ной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами сигналов (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют методом расширения спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная

кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т. е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне F одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей F . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одновременной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет из себя метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч).

Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на N субпотоков, где N — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность его аппаратной реализации. Однако сегодня, с развитием полупроводниковой технологии, это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 a/g и DVB, а также является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения кафельных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это **фиксированное распределение временных интервалов** между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или **классическая схема Aloha**. В ней при передаче данных мобильным устройством не используется какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в

любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 70-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHNET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18% загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился **метод множественного доступа с детектированием несущей (Carrier Sense Multiple Access — CSMA)**. Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В p -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью p . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью $1 - p$, т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В l -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), используемая в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 используется схожая схема — **бесприоритетный множественный до-**

ступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

Схема с цифровым детектированием (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посылает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является **схема множественного доступа с распределением по запросу (Demand Assigned Multiple Access — DAMA)**, называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посылает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

Схема TDMA с резервированием отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на N интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют $N \cdot k$ интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной каналу станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересылать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

Схема с резервированием пакетов (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассылает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом он не зарезервировал временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т. е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

ГЛАВА 2

СПУТНИКОВЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

2.1. Исторический очерк развития спутниковой связи

Артур Чарльз Кларк в статье «Extra-terrestrial Relays», опубликованной в 1945 г. в журнале *Wireless World*, пророчески писал: «Искусственный спутник Земли на определенном расстоянии от поверхности будет совершать один оборот каждые 24 часа. То есть постоянно оставаться над одной точкой земного шара. Из-за чего он будет в пределах прямой видимости почти половины поверхности Земли. Три ретрансляционных станции, расположенные на этой орбите в пределах 120 градусов, позволят охватить всю планету телевидением и радиосвязью».

Через пятнадцать лет, как только появилась техническая возможность вывода искусственных спутников Земли, начались и работы в области создания спутниковых систем связи (ССС). Первым спутником связи стал запущенный 12 августа 1960 г. американский космический аппарат (КА) Echo-1. Это был пассивный ретранслятор — надувной шар диаметром порядка 30 м (100 футов) с металлизированной оболочкой на орбите немногим выше 1,5 тыс. км. Он служил экспериментальным целям, в дальнейшем направление пассивных ретрансляторов в силу неэффективности развития не получило.

Активный ретранслятор впервые выведен на орбиту 10 июля 1962 г. — им стал спутник Telstar I. Орбита этого КА оказалась в районе так называемого первого радиационного пояса Ван-Аллена. В результате все его электронное оборудование вышло из строя за несколько недель. Запущенный на следующий год Telstar II был более радиационностойким и проработал гораздо дольше. Он позволял передавать один телевизионный канал или 60 дуплексных телефонных каналов. Через Telstar II была организована первая успешная трансатлантическая телепередача. Однако орбита этого КА была низкой, а мощность передатчика не превышала 2 Вт. Все это требовало больших

наземных антенн со сложной системой сопровождения спутников, а также делало невозможным продолжительные сеансы связи.

Но уже в 1963 г. начались запуски КА серии Syncom на геостационарные орбиты. Первые две попытки были неудачны (14 февраля и 26 июля, в последнем случае орбита была почти геосинхронной, период обращения составлял 24,2 часа, но с наклоном около 30°). Однако 19 августа 1964 г. Syncom-3 занял свое место на геостационарной орбите [32]. Связь через него обеспечивали две наземные станции с 9-метровыми антеннами — в городе Лейкхерсте (США, шт. Нью-Джерси) и на судне «Кингспорт», стоявшем в Гвинейском заливе близ нигерийского города Лагос [11]. Syncom-3 использовался для трансляции Олимпийских игр 1964 г. в Токио.

После запуска Syncom-3 20 августа 1964 г. представители 11 государств под эгидой США подписали соглашение о создании международного консорциума спутниковой связи «Интелсат». 6 апреля 1965 г. консорциум запустил свой первый спутник Intelsat-I (его символично назвали «ранней птичкой» — Early Bird). Это был первый коммерческий телекоммуникационный спутник. Оснащенный двумя транспондерами (транспондер — комплект приемопередающего оборудования на один канал) для работы в канале шириной 25 МГц, он поддерживал одновременно один телевизионный канал и 480 голосовых каналов. Сегодня и консорциум «Интелсат» входят 134 государства, он обеспечивает 2/3 всех международных телефонных разговоров, не считая других телекоммуникационных приложений. Современный спутник Intelsat VI обладает пропускной способностью 80 тыс. голосовых каналов.

Первый отечественный спутник связи «Молния-1» был выведен на орбиту также с третьей попытки. Случилось это 23 апреля 1965 г. Тем самым было положено начало региональным ССС и спутниковым группировкам на высокоэллиптических орбитах.

Так зарождались современные ССС. С тех пор в течение 40 лет процесс этот стремительно развивается. О каждом отдельном направлении ССС можно писать книгу. Поскольку такой возможности у нас нет, очень сжато расскажем, что же представляют собой спутниковые системы связи.

2.2. Виды орбитальных группировок. Геостационарные орбиты

Многие важнейшие свойства ССС напрямую зависят от высоты и типа орбит КА, а также от их числа в составе орбитальной группировки. Высоты орбит не могут быть произвольными. Первое ограничение связано с тем, что наша планета окружена двумя облаками иони-

зированных частиц, так называемыми поясами Ван-Аллена. Эти частицы удерживаются благодаря магнитному полю Земли. Пояса Ван-Аллена расположены в экваториальной плоскости. Первый пояс — на высотах от 1,5 до примерно 4 тыс. км, его «толщина» около 600 км. Второй пояс Ван-Аллена расположен на высотах 13–19 тыс. км и занимает области порядка 500 км по обе стороны от плоскости экватора, «толщина» — 1000 км. Уровень ионизационного излучения в области поясов Ван-Аллена — порядка 10 тыс. имп./с, что, по крайней мере на порядок выше прилегающих зон. Очевидно, что КА в этих районах лучше не летать. Поэтому выделяют четыре основные градации высот орбит: низкоорбитальные группировки (LEO — low earth orbit) с высотами порядка 500–2000 км, средневысотные группировки (MEO — medium earth orbit) с высотами 5–15 тыс. км (между первым и вторым поясами Ван-Аллена), геостационарные орбитальные группировки (GEO) на фиксированной высоте 36 тыс. км и орбитальные группировки на высокоэллиптических орбитах (HEO). В последнем случае орбита представляет сильно вытянутый эллипс с Землей в одном из его фокусов. Высоты в апогее (наивысшей точке), как правило, составляют порядка 7–70 тыс. км, в перигее — 400–500 км. Каждая из этих орбитальных позиций обладает своими достоинствами и недостатками.

О важности GEO еще в 1945 г. писал Артур Кларк. Как и следует из названия, период обращения спутника на этой орбите строго соответствует периоду вращения Земли. Нетрудно заметить, что возможна всего одна такая орбита, расположенная в экваториальной плоскости Земли. Простейший расчет показывает, что ее радиус 42 164 км (или высота 35 768 км от поверхности Земли), соответственно протяженность 264 790 км. КА на геостационарной орбите неподвижно висит над заданной точкой Земли, поэтому GEO еще называют геосинхронной орбитой. Очевидно, что трех спутников на GEO достаточно, чтобы по крайней мере один из них был в зоне прямой видимости в любой точке Земли. Неудивительно, что с 1964 г. нашлось немало желающих разместить свои спутники на GEO. Проблема в том, что близко расположенные спутники, работающие в одинаковых частотных диапазонах, будут серьезно мешать работе друг друга. Ситуацию нужно было урегулировать, для чего и был организован Международный комитет по регистрации частот (IFRB — International Frequency Registration Board). Эта организация занимается вопросами распределения позиций (точек стояния) на GEO. Стандартный шаг точек стояния — 1°. Однако допускается интервал и 0,5°, если частотный диапазон соседних спутников существенно различен. Таким образом, всего возможно не более 720 точек стояния. В одной точке стояния разрешено располагать несколько спутников, если они принадлежат одной стране или компании.

Достоинства КА на GEO связаны с их неподвижностью относительно Земли и хорошей видимостью. В результате отпадает необходимость перестройки антенн наземных станций, нет изменения частот в связи с эффектом Доплера и т. д. Но у этой медали есть и обратная сторона. Прежде всего, из-за столь высокой орбиты возникает более чем ощутимая задержка распространения сигнала на трассе Земля — спутник — Земля — никак не менее 500 мс ($36\,000 \text{ км} \times 2/300\,000 \text{ м/с} = 0,48 \text{ с}$), реально — от 600 мс. Напомним, в телефонии задержка распространения сигнала не должна превышать 250 мс, иначе это становится заметным. С задержками 500–600 мс не справятся никакие системы компенсации эхо-сигнала. Высокая орбита существенно повышает требования к мощности передатчиков и чувствительности приемников, к размерам приемопередающих антенн. Для того чтобы спутник постоянно находился в определенной точке геостационарной орбиты, требуется периодическая коррекция его полета. Наконец, чтобы вывести спутник на высокую орбиту, нужен достаточно мощный носитель. Достаточно сказать, что долгое время в СССР не могли вывести спутник на геостационарную орбиту именно из-за проблем с мощными ракетами-носителями. В США дело обстояло лучше не только из-за более чем десятилетнего технологического опережения в создании мощных носителей, но и из-за лучшего географического положения (ближе к экватору) стартовой позиции. Использование же мощного носителя неизбежно приводит к удорожанию запуска и всей ССС в целом, тем более что срок жизни КА ограничен (у современных КА — 10–15 лет).

Еще один недостаток КА на GEO — в полярных районах (в широтах выше 76,5°) они становятся практически невидимыми. А по крайней мере для России наличие связи в этих областях достаточно актуально. Альтернативой в данном случае может стать так называемая высокоэллиптическая орбита.

2.3. Эллиптические, средневысотные и низкие орбиты

Эллиптические орбиты характеризуются углом наклона плоскости орбиты к плоскости экватора, координатами узлов орбиты (точек ее пересечения с плоскостью экватора) и эксцентриситетом (отношением большой и малой осей эллипса). Видимо, первым спутником связи на эллиптической орбите стал американский Relay-1, запущенный 13 декабря 1962 г. (хронологически второй активный ретранслятор на орбите). Апогей его орбиты достигал 7,4 тыс. км, перигей — 1,3 тыс. км.

Период обращения КА на эллиптических орбитах выбирается кратным суткам. Так, у отечественной ССС «Молния» высота орбиты в апогее достигает 40 тыс. км, в перигее — 460 км, наклонение — $63,5^\circ$, период обращения КА — 12 часов. Скорость движения КА в апогее значительно ниже, чем в перигее, поэтому время его видимости в требуемом регионе существенно выше, чем у спутника на круговой орбите. КА ССС «Молния» виден с территории России 8–10 часов, т. е. всего трех спутников достаточно для обеспечения непрерывной связи. Отметим, что из-за неоднородности гравитационного поля Земли наклонение эллиптической орбиты может быть только $63,4^\circ$ (и симметрично ей $116,6^\circ$). Иначе обеспечить стабильное положение орбиты КА проблематично. Также следует учитывать, что КА на НЕО неизбежно пересекают пояса Ван-Аллена. Еще один недостаток, свойственный всем негеостационарным ССС, — доплеровское смещение частоты из-за различной с точки зрения земного наблюдателя скорости движения спутника, а в случае НЕО у КА существенно различается еще и собственная скорость.

Средневысокие орбиты располагаются между первым и вторым поясами Ван-Аллена на высотах 5–15 тыс. км. Зона охвата таких КА существенно ниже, чем у КА на геостационарных или высокоэллиптических орбитах. Кроме того, время пребывания в зоне радиовидимости наземной станции у КА на МЕО составляет 1,5–2 часа. Поэтому для организации глобальных ССС необходимо порядка 10 КА. Из наиболее известных ССС (проекты) на МЕО можно назвать региональную систему ICO (10 активных КА + 2 резервных, высота орбиты 10 355 км, наклонение 45°) и глобальные системы «Ростелсат-В» (24 КА, высота орбиты 10 360 км, наклонение 82°) и Spaceway NGSO (20 КА, высота орбиты 10 352 км, наклонение 55°).

Конечно, увеличение числа спутников в орбитальной группировке и постоянное изменение их местоположения — это существенные недостатки ССС на МЕО по сравнению с геостационарными группировками. Однако они же превращаются в достоинства. Прежде всего, существенно сокращаются задержки распространения сигнала (максимум 130 мс), что позволяет использовать такие ССС для задач телефонии. Кроме того, если в группировке несколько спутников, по крайней мере один из них виден под углом, большим 30° , а это весьма существенно для уменьшения влияния рельефа земной поверхности. Благодаря данной особенности, а также более низким орбитам существенно снижаются требования к мощности/чувствительности приемопередающей аппаратуры.

Период обращения спутников на орбитах высотой 10 350 км составляет 6 часов, при этом в тени Земли КА пребывают лишь несколько минут. Следовательно, их солнечные батареи (основной источник энергии) практически постоянно питают бортовую сеть, что суще-

ственно упрощает систему обеспечения электроэнергией и обеспечивает срок жизни КА до 10–15 лет — практически такой же, как и у спутников на GEO (в первую очередь за счет минимального числа циклов перезарядки аккумуляторных батарей).

Низкими считаются орбиты, лежащие ниже первого пояса Ван-Аллена, т. е. с высотами 500–2000 км. Как правило, это круговые орбиты с наклонением 0° (экваториальные), 90° (полярные) и малонаклонные орбиты. Достоинства низкоорбитальных спутниковых группировок очевидны — на один-два порядка меньше по сравнению с МЕО и GEO расстояние до ретранслятора. В результате требования к мощности наземных передатчиков и параметрам антенн снижаются настолько, что наземные абонентские станции могут уже почти не отличаться от сотовых телефонов. Именно низкоорбитальные ССС Iridium и Globalstar стали первыми глобальными системами спутниковой персональной телефонии. Низкая высота также обеспечивает малые задержки распространения, порядка десятков миллисекунд. Однако плата за низкие орбиты — необходимость в достаточно большом числе КА в составе орбитальной группировки. Это естественно, поскольку на орбитах высотой 500–2000 км период обращения составляет 1,5–2 часа. В сочетании с малой зоной радиопокрытия это приводит к тому, что в течение одного витка КА вокруг Земли абонентская станция находится в зоне радиовидимости его транспондера несколько минут. Поэтому в состав орбитальных группировок низкоорбитальных ССС входит от 48–70 КА (288 в ССС Teledesic).

Еще один минус LEO — относительно малый срок жизни КА. Прежде всего, на столь низких орбитах КА примерно треть времени находятся в тени Земли, что требует частых перезарядок аккумуляторных батарей. На орбитах ниже 700 км плотность атмосферы еще достаточна, чтобы требовалась постоянная коррекция орбиты КА. Выше же 1500 км КА оказываются в первом поясе Ван-Аллена, что сокращает время жизни электронной аппаратуры даже при использовании специальных защитных средств. В результате срок жизни КА на LEO составляет 5–7 лет.

2.4. Архитектура и основные принципы работы спутниковых систем связи

Любая ССС состоит из трех сегментов: пользовательского, спутникового и сегмента управления. Пользовательский сегмент — это сеть абонентских станций. Сегмент управления включает несколько наземных станций, обеспечивающих управление и сопряжение ССС с наземными системами связи. Спутники на орбите выполняют роль

ретрансляторов. В этом смысле они мало отличаются от традиционных ретрансляционных систем.

Возможны три основных направления передачи информации: Земля-КА (восходящий канал), КА-Земля (нисходящий канал) и спутник-спутник. В последнем случае бортовая аппаратура КА может выполнять функцию маршрутизации трафика. КА, как правило, поддерживает несколько независимых каналов приема-передачи (стволов или транспондеров). Современные КА могут содержать десятки транспондеров. Известно несколько схем спутниковой ретрансляции. Наиболее простая — это схема группового повторителя (прозрачная ретрансляция). Принимаемый групповой сигнал (от наземной станции) преобразуется без демодуляции в сигнал выходной частоты, усиливается и транслируется. Известны методы разделения входного канала на несколько подканалов и отдельная обработка (усиление) в каждом из них. Наконец, в современных ССС, поддерживающих пакетную коммутацию, т. е. с демодуляцией и декодированием сигнала на борту КА, применяются регенеративные схемы ретрансляции — сигнал восстанавливается до исходного потока данных, а затем вновь преобразуется в ВЧ-сигнал.

С точки зрения зоны обслуживания выделяют глобальные (охватывающие значительную часть территории Земли) и региональные ССС (т. е. оптимизированные для обслуживания определенного региона или страны). Характерный пример глобальных ССС — Intelsat, Inmarsat, региональных — «Молния», Eutelsat, Arabsat.

Согласно исторической традиции ССС принято делить на системы фиксированной спутниковой связи (СФСС) и подвижной (СПСС). Сегодня это деление достаточно условно, и речь скорее надо вести о возможной скорости передачи данных (или о широкополосной и узкополосной связи). Однако данная градация отражена в действующих нормативных документах, и игнорировать ее нельзя. Для ФСС предусмотрено несколько возможных диапазонов частот: С-диапазон (5,9–6,4 и 3,7–4,2 ГГц, восходящий и нисходящий каналы соответственно), Ku-диапазон (14,0–14,5 и 11,7–12,2 ГГц) и Ka-диапазон (27–31 и 17–21 ГГц). В последнее время начинают осваивать Q- и V-диапазоны (в районе 40 и 50 ГГц). Для межспутниковых каналов используют диапазоны 54–58 и 59–64 ГГц. Наиболее развитая система ФСС несомненно Intelsat. Основанная в 1964 г. как международная организация, Intelsat в 2001 г. стала частной компанией. К началу 2004 г. в ее орбитальную группировку входило 28 действующих КА (и два резервных) на геостационарной орбите. ССС Intelsat связывает пользователей более чем в 200 странах мира.

Формально СПСС должны работать в L- и S-диапазонах частот (1,53–2,7 МГц и 2,7–3,5 ГГц) и ниже 1 ГГц. Но развитие микроэлектронных технологий позволяет сегодня делать вполне мобиль-

ными и абонентские станции в Ka-диапазоне. Крупнейший оператор СПСС — это основанный в 1979 г. международный консорциум Inmarsat, в 1999 г. преобразованный в частную компанию. Он располагает орбитальной группировкой на GEO в составе 5 КА Inmarsat I-3 третьего поколения (один — резервный), образующей глобальную систему мобильной связи. До этого в группировку входили 4 КА Inmarsat I-2 второго поколения (запуски в 1990–1992 г.). ССС Inmarsat работает в L- и S-диапазонах и поддерживает несколько стандартов предоставления услуг как телефонной связи, так и низкоскоростной передачи данных. Основной недостаток системы Inmarsat — удаленность ее КА, находящихся на GEO, и связанный с этим комплекс проблем. Даже специально разработанный терминал стандарта Inmarsat Mini-M весит около 3 кг и по размерам соответствует ноутбуку.

В начале–середине 90-х годов появилось несколько десятков проектов создания низко- и среднеорбитальных ССС как для задач телефонии, так и для широкополосной передачи данных (к 1977 г. в ИТУ поступило около 50 таких проектов). В области телефонии до практической реализации дело дошло лишь у двух глобальных низкоорбитальных систем — Iridium и Globalstar (персональные спутниковые телефоны). Первая пережила банкротство и медленно возвращается к жизни, вторая пребывает в состоянии банкротства. Та же судьба постигла и ССС на МEO — ICO. Наиболее амбициозным низкоорбитальным проектом спутниковой СПИ была система Teledesic. Предполагалось, что эта система с орбитальной группировкой в 288 КА будет работать в Ka-диапазоне, однако подобные системы получаются очень дорогими. Наземные беспроводные СПИ развиваются столь стремительно, что конкурировать с ними низкоорбитальным ССС оказалось не под силу.

Видимо, первой услуги широкополосной передачи информации мобильным пользователям станет предоставлять Inmarsat, в ближайших планах которого — запуск на GEO спутников четвертого поколения Inmarsat I-4, обеспечивающих обмен с абонентскими терминалами на скоростях до 432 кбит/с и совместимость с системами сотовой связи третьего поколения (первый спутник Inmarsat I-4 успешно запущен 11 марта 2005 г.).

Упомянем еще об одном виде низкоорбитальных ССС, так называемых little-LEO. Это ССС, работающие в частотном диапазоне ниже 1 ГГц и выполняющие функцию передачи небольших объемов информации вне реального времени. Характерный пример — системы «Гонец» и Orbcomm. КА систем «Гонец» — это ретрансляторы с зоной обслуживания диаметром примерно 5 тыс. км (высота орбиты 1500 км, наклонение 82,5°). Если принимающий абонент находится вне зоны обслуживания, информация запоминается и передается

при пролете КА через его регион. Основное назначение таких систем — электронная почта и пейджинг. Они относительно просты, что существенно снижает стоимость оборудования и услуг.

В последнее десятилетие чрезвычайно мощное развитие получили сети, использующие геостационарные КА и наземные станции с очень малой апертурой антенн (VSAT — Very Small Aperture Terminal) и их разновидность USAT — станции с ультрамалой апертурой антенн (диаметром менее 0,5 м). VSAT-системы широко используются при создании корпоративных ССС. Такие системы за счет относительной простоты и невысокой стоимости наземных станций (диаметр антенн порядка 1,5–1 м в Ku-диапазоне и 0,5 м в Ka-диапазоне) позволяют достаточно просто объединить удаленные друг от друга локальные объекты в единую сеть передачи информации со скоростями обмена порядка 2 Мбит/с и выше. И если бы не особенности национального регулирования связи, ряд из них вполне можно было бы отнести к подвижным системам.

Архитектура VSAT-сетей может быть произвольной: «точка-точка», «каждый с каждым», «звезда». Однако для построения распределенных сетей передачи данных наиболее приемлема последняя технология. Она подразумевает наличие одной центральной наземной станции с большой антенной и ряд удаленных терминалов. Связь организуется через центральную станцию в режиме разделения времени. Используют и технологию «каждый с каждым», при этом каналы, как правило, не фиксированы и предоставляются по запросу (механизм DAMA). С точки зрения спутникового сегмента отличие технологии VSAT — зона обслуживания не покрывается одним глобальным лучом, а разбита на ряд сегментов, охватываемых рядом относительно узких лучей. Такой метод поддерживают практически все современные КА на GEO. Отметим, что на фоне неудач низкоорбитальных спутниковых систем передачи данных рынок VSAT-систем успешно развивается, в том числе и в нашей стране. В качестве характерной VSAT-системы назовем принадлежащую ОАО «Газпром» систему «Ямал».

2.5. Методы множественного доступа в ССС

Один из основных вопросов построения телекоммуникационных сетей — доступ множества абонентских (терминальных) устройств к общему коммуникационному ресурсу, в случае ССС — к транспондерам. Существует несколько методов мультиплексирования каналов.

Исторически первый метод мультиплексирования — это частотное разделение каналов (FDM), в том числе дуплексных (FD). Самая простая его разновидность — фиксированное назначение диа-

пазона каждой станции (FAMA — fixed-assignment, multiple access). Каждому каналу присваивается свой фиксированный диапазон (своя несущая). В результате, для того чтобы установить дуплексное соединение между двумя станциями, необходимо задействовать четыре частотных канала (т. е. два транспондера). Данный механизм существенно упрощает бортовую аппаратуру КА, ретранслятор работает в режиме повторителя. Однако его ресурс расходуется достаточно неэффективно, фактически число возможных соединений точка-точка между наземными станциями равно числу транспондеров у КА. Типичный пример — ССС, работающие в С-диапазоне (подавляющее большинство стволов отечественных геостационарных ССС). Ширина полосы восходящего/нисходящего канала при этом 500 МГц. Как правило, КА поддерживает 12 транспондеров, ширина канала каждого — 36 МГц (плюс защитный интервал 4 МГц между каналами и по 10 МГц на краях диапазона 500 МГц). Число каналов можно удвоить, используя ортогональную поляризацию сигнала: 12 нечетных транспондеров работают с вертикальной поляризацией антенн, 12 четных — с горизонтальной. При этом центральная несущая вертикально поляризованных каналов смещена на 20 МГц относительно горизонтально поляризованных. Метод FDM/FD/FAMA хотя и наиболее простой в реализации, но и наиболее неэффективный, особенно когда увеличивается число наземных терминалов.

Дальнейшим развитием множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA) стал метод SCPC (single channel per carrier) — один канал на несущую. Речь идет в данном случае о телефонном канале шириной 4 кГц. Суть его в том, что весь частотный диапазон делится, например, на субканалы 4 кГц, каждый со своей независимо модулируемой несущей. Распределение подканалов между станциями происходит на основе метода DAMA (demand-assignment, multiple access) — множественный доступ с назначением канала по запросу. Это означает, что перед началом трансляции каждая станция сообщает центральной (управляющей), что она хочет установить соединение с другой станцией. Для служебных сообщений выделяется специальный сигнальный канал, с помощью которого происходит распределение подканалов между станциями, так чтобы не было двух станций, одновременно работающих в одном частотном подканале. Скорость передачи данных в каждом подканале зависит от его ширины, механизма кодирования и вида модуляции. Впервые механизм FDMA/DAMA был реализован компанией Comsat в спутниках Intelsat серий IV A и V. В этой системе в сигнальном канале обмен происходит в режиме доступа с разделением времени (TDM). Информация передается в циклически повторяющихся кадрах длительностью 50 мс. Кадр разбит на 50 тайм-слотов по 1 мс. Каждый тайм-слот закреплен за определенной наземной станцией (в системе

Intelsat их не более 50). В течение тайм-слота наземная станция может передать на частоте служебного канала 128 бит — запросы на предоставление голосового канала или сообщение об освобождении канала.

Исторически следующим после FDMA стали использовать механизм множественного доступа с разделением каналов по времени (TDMA — time-division multiple access). Принцип его прост: вся передача происходит в циклически повторяющихся кадрах (фреймах), разделенных на интервалы (тайм-слоты) равной длительности. Каждому передатчику назначается (на постоянной или временной основе) определенный тайм-слот. Основная проблема при этом — не потерять кадровую синхронизацию, для чего в начале каждого кадра передается определенная синхропоследовательность. В свое время Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств CEPT приняла как стандарт структуру базового TDMA-кадра для передачи голосовой информации. Предполагается, что после оцифровки и кодирования поток голосовых данных в каждом канале представляет последовательность 8-разрядных выборок с частотой 16 кГц. Один TDMA-кадр обслуживает 16 независимых голосовых каналов. Выборки каждого из них (по 8 бит) последовательно формируют подкадр из 128 бит. Скорость передачи (с учетом частоты выборок 16 кГц) 2,048 Мбит/с. 32 последовательных подкадра образуют кадр длительностью 2 мс. Это означает, что каждая наземная станция может передавать данные в одном голосовом канале порциями по 32 8-разрядные выборки каждые 2 мс. Отметим, что реальное время передачи базового TDMA кадра в 59 раз меньше (33,9 мкс) — скорость передачи наземной станцией базового TDMA-кадра CEPT составляет 120 832 Мбит/с.

Достоинство технологии TDMA перед FDMA, прежде всего, в том, что в транспондере все время присутствует одна модулированная несущая, т. е. существенно снижаются межканальные интермодуляционные помехи. Упрощается и аналоговая часть аппаратуры (нет необходимости отдельно обрабатывать множество частотных каналов). Технология TDMA гораздо лучше подходит для множественного доступа при передаче цифровых данных.

Более универсальным и перспективным методом множественного доступа является технология кодового разделения каналов (CDMA). Основные ее достоинства: невысокая пиковая мощность сигнала, гибкость перестройки каналов и выбора полосы канала, простота перехода с канала на канал, возможность работы нескольких станций в одном частотном диапазоне. Метод этот относительно недавно нашел применение в СССР (впервые — в системе Omnitrac). Характерные примеры использующих его систем — СССР Globalstar и Ellipso. Отметим, однако, что именно на CDMA (в различных

вариациях этой технологии) основываются многие проекты перспективных СССР.

Еще один перспективный метод множественного доступа — мультиплексирование посредством ортогональных несущих (OFDM). Он требует относительно сложных средств цифровой обработки сигнала, поэтому до определенного момента и не получил должного распространения. Однако именно на основе данной технологии построен стандарт цифрового телевизионного вещания DVB, в том числе и его спутниковый вариант DVB-S.

В заключение беглого обзора СССР отметим, что они все еще остаются достаточно дорогим удовольствием. Именно поэтому ряд технически восхитительных проектов так и не был реализован (например, Teledesic — глобальная космическая сеть передачи данных). По-видимому, их время пока не пришло.

ГЛАВА 3

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

По определению транкинг (trunking) — это метод равного доступа абонентов к общей для них группе каналов связи, при котором конкретный канал предоставляется абоненту для каждого сеанса связи заново. Иными словами, это метод доступа многих пользователей к общему каналному ресурсу. В этом смысле термин «транковые сети» можно трактовать очень широко — подавляющее большинство современных систем связи, включая обычную проводную телефонию, действуют именно по этому принципу. Однако, вопреки определению, под транковыми сетями связи понимают вполне определенный класс систем связи, а именно беспроводные корпоративные сети, использующие принцип свободного доступа абонентов к общему пулу каналов. Отметим, что русскоязычное определение сетей данного класса не устоялось — специалисты говорят и «транкинговый», и «транковый». Для определенности будем придерживаться последнего термина.

Расцвет транковых сетей пришелся на период начала 90-х годов, вплоть до становления систем сотовой связи. Возможно, первой в мире системой транковой связи была еще памятная многим отечественная система «Алтай». Может быть, она бы успешно работала и поныне, если бы массогабаритные и эксплуатационные характеристики ее радиотелефонов не перестали удовлетворять даже самых непритязательных пользователей. Однако с развитием технологий сотовой связи на долю транковых систем остались весьма специфические области применения, где проявляются их основные достоинства. Это, прежде всего, малое время установления соединения (менее секунды), автономность сети (проще контролировать систему), возможность обеспечить высокую защищенность от несанкционированного доступа как к каналному ресурсу, так и к передаваемым данным. Транковые сети эффективны там, где стоимость самой дорогой системы связи несоизмерима с возможными последствиями сбоев, случайных или преднамеренных, или несанкционированного доступа к данным. Речь идет о диспетчерских службах в энергети-

ческих и транспортных сетях, о силовых ведомствах, оперативных службах и т. п.

3.1. Виды транковых сетей связи

Исторически первые транковые системы пришли на смену корпоративным аналоговым радиосетям с жестким распределением каналов. Первые системы транковой связи были аналоговыми. По существу, они представляли собой системы аналоговой радиосвязи с каналами фиксированной ширины (в основном 12,5 или 25 кГц) и средствами предоставления доступа к этим каналам. Собственно, все стандарты (открытые и корпоративные) в области аналоговой транковой связи специфицируют именно систему сигнализации и самые общие требования к приемопередающей аппаратуре. Механизм непосредственной передачи в радиоканале находится «вне зоны их компетенции» — лишь бы не было межканальных помех. В наиболее простых аналоговых системах транковой связи абонентские станции представляли собой стандартные портативные радиостанции соответствующих диапазонов, оснащенные дополнительным транковым модулем.

По схеме построения транковые сети могут быть одно- и многозональными. В первом случае в систему входит одна базовая ретрансляционная станция (с одной зоной обслуживания). В многозональных сетях базовых станций несколько. При этом управление может быть как сосредоточено в центральном контроллере (централизованное управление), так и возложено на оборудование базовых станций (распределенное управление). Как правило, все транковые системы строятся по модульному принципу, т. е. в минимальной конфигурации это может быть одна базовая станция с двумя каналами. Впоследствии оборудование можно наращивать, вплоть до общекорпоративных сетей.

При свободном доступе к каналам возможны два основных механизма распределения ресурсов: когда поиском и распределением свободных каналов занимается базовая станция и когда абонентская станция сама находит свободный канал. Оба метода требуют передачи специальных команд — вызов, отбой, групповой вызов, аутентификация и т. п. Совокупность этих команд называют системой сигнализации. Управляющие сообщения могут передаваться как в специальном сигнальном канале, так и в рабочих каналах. В последнем случае сигнализация транслируется в собственно разговорном канале (в полосе 300–4000 Гц, внутриполосная сигнализация) либо вне его (в полосе 0–300 Гц, субтональная сигнализация) — все как в обычной проводной телефонии.

Простейший и наиболее распространенный пример внутриполосной сигнализации, широко распространенной в проводной телефонии

и используемой в транковых системах, — это двухчастотная система DTMF, применяемая при «тоновом» наборе номера. Наиболее распространенная система внеполосной сигнализации — CTCSS (Continuous tone controlled signaled system), описанная в британском стандарте MPT 1306. Она (в базовой конфигурации) представляет собой оговоренный набор из 32 частот в диапазоне 67–250,3 Гц.

Характерный пример распределенной системы транковой связи — это ставшая популярной в нашей стране к концу 90-х годов система SmarTrunk и ее дальнейшее развитие SmarTrunk II. Систему SmarTrunk впервые продемонстрировала компания Selectone (США) в 1992 г. Дальнейшим ее развитием занималась отпочковавшаяся в 1996 г. фирма SmarTrunk Systems. SmarTrunk — это протокол, определяющий механизм доступа абонентов к 16 возможным аналоговым дуплексным каналам. Каждая станция, желая установить соединение, сканировала все доступные каналы и, обнаружив свободный, посылала центральной станции запрос на его захват. В результате процедура установления соединения занимала от 2 до 11 с. Система сигнализации — внутриволосная, DTMF. Из-за низкой надежности и защищенности последней и появилась усовершенствованная система SmarTrunk II с цифровой сигнализацией (BPSK). Вся работа ведется через ретранслятор — свой для каждого дуплексного канала. Был реализован механизм аутентификации общего вызова, связи с городской телефонной сетью и т. п. Рабочий диапазон частот, вообще говоря, может быть произвольным, но наиболее распространенные диапазоны 146–174, 400–490, 300–344 и даже 800 МГц.

Наибольшее распространение получили аналоговые транковые системы на основе группы стандартов Министерства почты и телекоммуникаций Великобритании (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Центральным в этой группе выступает стандарт MPT 1327 («A Signalling Standard for Trunked Private Land Mobile Radio Systems») — «Стандарт сигнализации частных наземных систем транковой подвижной радиосвязи». Он был опубликован в 1986 г. и окончательно утвержден в 1987 г. Отметим, что хотя аналоговые транковые сети на основе стандартов MPT и называют (мы следуем этой традиции) «системы стандарта MPT 1327», однако требования к ним содержатся и в других стандартах группы MPT. В частности, спецификация MPT 1347 описывает интерфейс системного радиооборудования и контроллеры транковой связи, MPT 1343 — интерфейс абонентского радиооборудования, MPT 1317 — формат кода синхронизации и т. д. Поскольку аналоговые транковые сети стандарта MPT 1327 — самые распространенные в мире (кроме, пожалуй,

США, где лидируют системы стандарта LTR), остановимся на нем несколько подробнее.

3.2. Аналоговые транковые сети стандарта MPT 1327

Разработчиком оборудования для первых систем MPT 1327 была фирма Fylde Microsystems. Позже был образован консорциум компаний-разработчиков, куда кроме Fylde вошли Tait Electronics, Philips, Motorola и Marconi.

Системы MPT 1327 изначально разрабатывались как многозоновые. В каждой зоне индивидуальные вызовы обрабатываются независимо. В случае обрыва межзонных связей базовая станция продолжает работать, но уже без обработки межзонных вызовов. Время соединения при внутрizonных вызовах не превышает 0,5 с, при межзонных — 1–2,5 с.

Теоретически сеть на базе MPT 1327 может обслуживать до 1 036 800 абонентов и состоять из 1024 зон по 24 канала в каждой. Однако даже наиболее крупные сети MPT 1327 далеки от таких показателей. Так, одна из крупнейших сетей Chekker Network компании Deutsche Telekom в 1998 г. насчитывала примерно 900 каналов в 160 зонах и обслуживала около 62 тыс. абонентов. В основном же транковые системы MPT 1327 включают 3–5 базовых станций с 4–8 каналами каждая и обслуживают 1–2 тыс. абонентов.

В системе MPT 1327 каждая станция имеет свой уникальный номер, присваиваемый производителем, — ESN (Electronic Serial Number). Для работы в сети требуется начальная регистрация станции и последующая аутентификация на основании ранее зарегистрированного номера.

Характерная особенность сетей стандарта MPT 1327 — наличие выделенного канала управления, по которому происходит обмен управляющей информацией между базовыми и абонентскими станциями. Физически это один из частотных каналов базовой станции. Остальные каналы предназначены для обмена речевой информацией и данными. Отметим, что при большой загрузке системы канал управления также можно использовать для передачи голоса или данных, хотя и с потерей некоторых функций. Канал управления может автоматически переноситься с одного частотного канала на другой (например, при появлении сильных помех).

Обмен сигнальной информацией происходит со скоростью 1200 бит/с посредством так называемой быстрой частотной манипуляции (FFSK — fast frequency-shift keying). Несущей с частотой 1200 Гц соответствует логическая 1, логическому 0 — 1800 Гц. Управляющая инфор-

мация передается пакетами, содержащими интервал для включения передатчика (длительностью 5 мс), синхропоследовательность (1010...10 — всего 16 бит), собственно информационное сообщение (64 бит) и последний бит согласования, значение которого зависит от последнего бита поля сообщения. Само сообщение состоит из кодового синхронизирующего синхрослова (C4D7₁₆ для канала управления, инверсное ему — для канала связи), признака адрес/данные (1/0), собственно информации (47 бит) и проверочной последовательности (16 бит). Для управления используется набор из 32 команд длиной 5 бит. Абонентские радиостанции постоянно принимают и анализируют сообщения в управляющем канале и, обнаружив в них собственный адрес, выполняют предписанные командой действия. Этот процесс происходит независимо от того, поддерживает абонентская станция в данный момент сеанс связи или нет. По управляющему каналу возможна передача не только командных сообщений, но и коротких (до 184 бит) и расширенных (736 бит) информационных сообщений (пейджинговые сообщения, данные GPS и т. п.).

Приемопередающее оборудование стандартом MPT 1327 не специфицируется. Для этого был разработан стандарт MPT 1347. В соответствии с ним интервал между несущими соседних каналов должен составлять 12,5 кГц, разнес дуэлексных каналов (нисходящий/восходящий) — 8 МГц, рабочий диапазон восходящих/нисходящих каналов — 201, 2125–207, 4875 и 193, 2125–199, 4875 МГц соответственно. При передаче речи предусматривается фазовая модуляция, для передачи данных — FFSK.

Сети MPT 1327 позволяют передавать не только речевые сообщения, но и данные со скоростями до 1200 бит/с. Особенность работы сетей в режиме прозрачности для цифровых данных описывает протокол MAP 27 (Mobile Access Protocol for MPT 1327 equipment).

Отметим, что на основе стандарта MPT 1327 делались попытки построить и цифровые системы (например, ACCESSNET-D компании Rohde & Schwarz), однако особого успеха они не имели.

3.3. Цифровая система trunkовой связи TETRA

Естественным развитием trunkовой связи стало появление цифровых систем, т. е. систем, где и служебная информация, и голосовые каналы передаются в цифровой форме. Основное достоинство цифровых систем применительно к trunkовой связи — это существенно более эффективное использование частотного ресурса. В самом деле, благодаря цифровым алгоритмам сжатия речи эффективная ширина голосового канала снижается до 6,25 кГц и ниже, что по крайней мере в 2–4 раза меньше, чем в аналоговых системах. Самой первой циф-

ровой системой trunkовой связи была система EDACS (Enhanced Digital Access Communications System) шведской компании Ericsson. Позже появились системы TETRA, APCO 25, TETRAPOL (компания Matra), iDEN (Motorola), ACCESNET-D (Rohde & Schwarz) и некоторые другие. Судьбы их были различными, отметим лишь, что только первые две из этого списка базировались на открытых стандартах и только в TETRA использовался механизм временного разделения каналов (TDM). Во всех остальных разделение каналов частотное (FDM). Возможно, именно это и предопределило определенный успех стандарта TETRA в Европе, включая и Россию.

В декабре 1994 г. по инициативе Motorola и Nokia представители 14 крупнейших производителей, среди которых были Philips, Alcatel, Ericsson, GEC-Marconi, подписали Меморандум о взаимопонимании в создании единого европейского стандарта trunkовой связи TETRA. Через год работу над новым стандартом продолжила рабочая группа Европейского института телекоммуникационных стандартов (ETSI). А еще через два года стало очевидно: несмотря на наличие конкурирующих систем, стандарт TETRA все более укрепляет свои позиции, приобретая общемировое значение.

До апреля 1997 г. аббревиатура TETRA означала Трансевропейское trunkовое радио (Trans-European Trunked Radio). Однако в связи с огромным интересом, который проявляют к стандарту в Южной Америке, Африке и Азии, территория его действия уже не ограничивается только Европой. Поэтому сегодня TETRA расшифровывают как Наземное trunkовое радио (Terrestrial Trunked Radio).

С самого начала стандарт TETRA разрабатывался как trunkовая система, эффективно и экономично поддерживающая совместное использование сети несколькими организациями, обеспечивая секретность и защищенность информации. Особое внимание в стандарте уделено интересам служб безопасности. Существенно, что TETRA — открытый стандарт. Это означает, что соответствующее стандарту оборудование различных производителей абсолютно совместимо. Доступ к спецификациям TETRA свободен для всех заинтересованных сторон, вступивших в ассоциацию «Меморандум о взаимопонимании и содействии стандарту TETRA» (MoU TETRA). Ассоциация объединяет производителей, разработчиков программного обеспечения, испытательные лаборатории и пользователей из 19 стран мира.

Стандарт TETRA не описывает всю сеть детально, как, скажем, GSM. В него входят спецификации беспроводного интерфейса, интерфейсов между сетью TETRA и цифровой сетью с интеграцией услуг (ISDN), телефонной сетью общего пользования, сетью передачи данных общего пользования, учрежденческими АТС и т. п. В стандарт включено описание всех основных и дополнительных услуг,

предоставляемых сетью. Специфицированы также интерфейсы локального и внешнего центрального управления сетью.

3.3.1. Технические особенности системы TETRA

TETRA представляет собой транковую систему связи, основанную на технических решениях и рекомендациях стандарта GSM. Радиоканалы разнесены с интервалом 25 кГц. Дуплексный разнос радиоканалов для передачи и приема — 10 МГц. В системе используется технология временного разделения каналов (TDMA) — в одной частотной полосе последовательно отводится время для передачи четырех логических каналов (рис. 3.1). Эти четыре канальных интервала (слота) образуют TDMA-кадры. Сообщения передаются мультикадрами продолжительностью 1,02 с. Мультикадр содержит 18 TDMA-кадров, один из которых — контрольный. TDMA-кадр состоит из четырех временных пакетов по 510 бит каждый. 432 бита в пакете (два блока по 216 бит) относятся к информационному сообщению. В середине пакета — синхропоследовательность SYNCH для синхронизации и обучения адаптивного канального эквалайзера в приемнике. Кроме того, пакеты в восходящем канале содержат интервал PA (Power Amplifier), предназначенный для установки мощности излучения. В этом случае в конце пакета размещается защитный интервал GP (Guard period) длительностью 0,167 мс (эквивалентно времени передачи 6 бит), исключая перекрытие соседних пакетов.



Рис. 3.1. Протокол информационного обмена системы TETRA

Передачу четырех речевых каналов в полосе 25 кГц обеспечивает низкоскоростной кодер речи с алгоритмом CELP. Скорость потока на выходе кодера 4,8 кбит/с. Общая же скорость цифрового потока данных после кодирования и включения служебной информации — 36 кбит/с. Однако благодаря применяемой в системе $\pi/4$ -DQPSK-модуляции (дифференциальная квадратурная фазовая модуляция) частота модуляции каждой несущей вдвое меньше — 18 кбит/с.

TETRA допускает прямую связь между радиостанциями без ретранслятора и расширение зоны радиопокрытия с помощью мобильных станций. Системы TETRA способны работать в широком диапазоне частот — от 60 до более чем 1000 МГц. За службами безопасности уже закреплены диапазоны 380–385/390–395 МГц. Для коммерческих организаций выделяются полосы 410–430/450–470 МГц и 870–876/915–921 МГц.

Разработаны два стандарта системы: TETRA PDO для передачи данных и TETRA V+D, поддерживающий как передачу данных, так и речевой обмен. Далее будем рассматривать последний стандарт.

Архитектура системы определяется условиями применения. Благодаря модульному принципу построения она может быть реализована с разными иерархическими уровнями и географической протяженностью (от локальной до национальной сети). Функции управления базой данных и коммутацией распределяются по всей сети. Это гарантирует быструю передачу вызова и локальную работоспособность даже при потере связи с отдельными ее элементами.

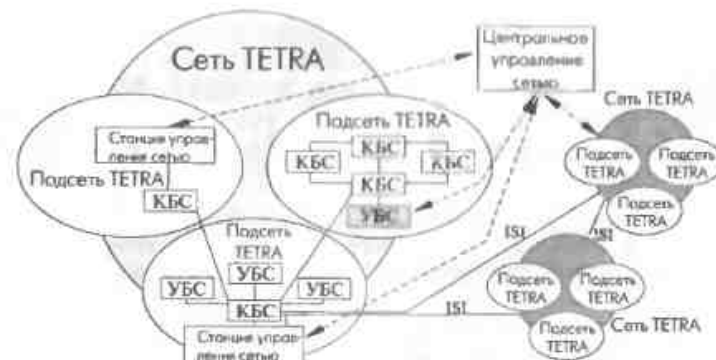


Рис. 3.2. Структура глобальной сети TETRA: КБС — контроллер базовой станции; УБС — блок управления базовой станцией; ИСИ — межсистемный интерфейс

На национальном или региональном уровне структура сети строится на основе сравнительно небольших подсетей TETRA, соединенных друг с другом (рис. 3.2). При этом возможно централизо-

ванное управление всеми подсетями. Кроме того, для соединения сетей TETRA применяется и стандартный межсистемный интерфейс (ISI). Структура подсети зависит от трафика и требований к эффективности и доступности. Поэтому в одних случаях она может быть простой, в других, когда элементы сети связаны друг с другом многочисленными каналами связи, сравнительно сложной (рис. 3.3). Если не требуется резервирования каналов, оптимальна конфигурация «звезды» (рис. 3.4). При использовании линейных трактов наилучшее решение — структура «цепи» (рис. 3.5). В этом случае каждый модуль устройства управления базовой станцией обеспечивает как требуемую дальность радиосвязи, так и локальный доступ к внешним сетям (телефонные сети общего пользования, учрежденческие АТС). Простейшая конфигурация сети включает лишь один такой модуль.

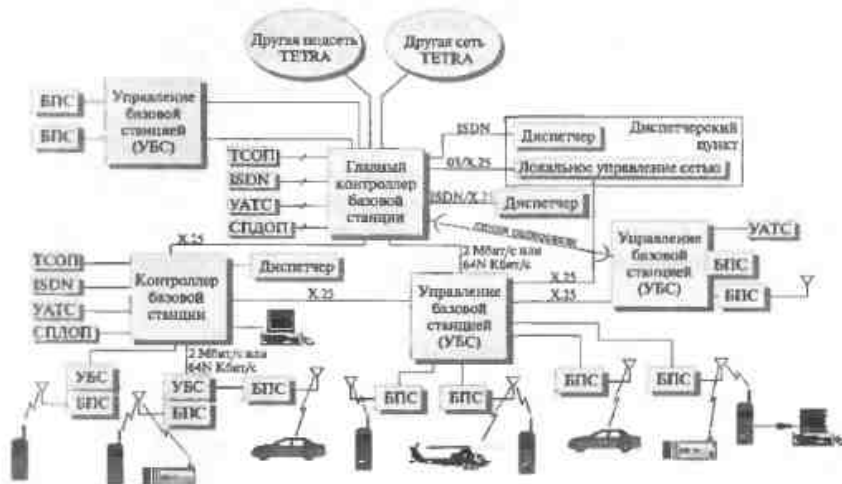


Рис. 3.3. Возможная конфигурация подсети TETRA: ТСОП — телефонная сеть общего пользования; СПДООП — сеть передачи данных общего пользования; БПС — базовая приемопередающая станция

Как уже отмечалось, система поддерживает трансляцию речи и данных. Причем речь и данные могут передаваться с одного терминала одновременно.

Речь передается в трех режимах:

- 1) коммутируемое двухточечное соединение между стационарными терминалами и мобильными абонентами; вызовы могут быть переданы в телефонную сеть общего пользования или во внешние учрежденческие АТС; связь — дуплексная;

- 2) коммутируемые многопунктовые двунаправленные соединения между вызывающей стороной и несколькими вызываемыми абонентами; связь — симплексная;
- 3) широковещательная передача речи (симплексная) от вызывающей стороны к нескольким вызываемым абонентам.



Рис. 3.4. Подсеть TETRA с конфигурацией типа «звезда»

Режимы передачи данных обеспечивают доступ к централизованным базам данных, передачу факсимильных сообщений, неподвижных изображений, видеосигналов и т. д.

Передача данных с коммутацией пакетов аналогична трансляции речи — те же режимы (двухточечная, многопунктовая, широковещательная передача) и характеристики (дуплексная, симплексная связь; обычный и защищенный график с несколькими скоростями передачи). Скорость обмена определяется используемым классом защиты от ошибок и числом временных интервалов, выделенных для связи (табл. 3.1). Число выделенных временных интервалов задается при вызове и может меняться в процессе передачи.



Рис. 3.5. Подсеть TETRA с конфигурацией типа «цепь»

Таблица 3.1. Связь скорости передачи в сети с уровнем защиты и числом интервалов

Уровень защиты	Скорости передачи, кбит/с			
	1 интервал	2 интервала	3 интервала	4 интервала
Защита отсутствует	7,2	14,4	21,6	28,8
Низкий уровень	4,8	9,6	14,4	19,2
Высокий уровень	2,4	4,8	7,2	9,6

Коммутируемые пакеты данных транслируются по виртуальным цепям или в виде датаграмм. В первом случае возможны только двухточечные соединения, а во втором — многоточечные соединения и широкоэвещательная передача. Пользователи системы могут подключаться и к внешним сетям пакетной передачи данных. Короткие сообщения (до 2048 бит) оперативно передаются независимо от трансляции речи и данных.

Каналы передачи данных выделяются в соответствии с тремя сценариями.

1. Канал присваивается в начале сеанса связи и освобождается по его завершении. Обычно данный сценарий используется для дуплексной связи или при резервировании канала в случае его непрерывной эксплуатации определенной группой пользователей (например, режим открытого канала). Его недостаток заключается в том, что канал нельзя задействовать при динамическом распределении ресурсов (система менее эффективна с точки зрения управления радиоресурсами).
2. Канал присваивается только на время одной транзакции (интервал передача/прием), после чего он освобождается. Для следующей транзакции с тем же вызовом может быть выделен новый канал. Этот метод эффективен при групповых вызовах, когда для различных вызовов совместно используется вся совокупность каналов.
3. В режиме квазипередачи данных, в отличие от предыдущих сценариев, канал освобождается с некоторой задержкой. И если следующая транзакция началась во время задержки, она задействует тот же канал, что и предыдущая. Достоинство метода — в уменьшении необходимых управляющих сигналов в сети.

В режиме с открытым каналом группа пользователей организует соединение по схеме «точка-многоточка» без какой-либо установочной процедуры, в том числе без задержки. Присоединившись к группе, можно воспользоваться этим каналом в любой момент. Связь — двухчастотная, симплексная.

При непосредственной передаче между терминалами устанавливаются двух- и многоточечные соединения по радиоканалам, не свя-

занным с каналом управления сетью, без передачи сигналов через базовые приемопередающие станции. Радиостанции работают в симплексном режиме на одной частоте. В этом режиме отдельные мобильные станции могут выполнять функции ретрансляции (повторителя) для увеличения зоны действия других станций, а также служить шлюзом между мобильной станцией, работающей в режиме непосредственной передачи данных, и сетью TETRA.

Пользователи сети регистрируются в соответствии с принадлежностью к определенной зоне, обслуживаемой несколькими базовыми приемопередающими станциями. В пределах данной зоны абоненты могут свободно перемещаться и устанавливать связь друг с другом. Протяженность зоны обслуживания конкретного пользователя определяется его потребностями и привилегиями и может колебаться от радиуса действия базовой станции до всей сети. Различные зоны предоставляют одинаковые услуги, которые могут поддерживать все радиотерминалы. Каждый пользователь имеет собственный «профиль» — список доступных услуг, хранящийся в его терминале и сети.

Если в процессе соединения мобильная станция регистрирует ухудшение условий связи, она проверяет возможность установления связи в соседних ячейках (повторный выбор ячейки) и посылает в сеть запрос на новый радиоканал (если вызов не потерян). Для повторного выбора ячеек предусмотрено три типа процедур. Процедуру первого типа можно сравнить с «бесшовным» переключением в системе сотовой связи, подобной GSM. В этом случае мобильная станция должна обладать информацией о новой ячейке и о распределении ее каналов (при необходимости запрос для регистрации передается заранее посредством старой ячейки). При процедуре второго типа мобильная станция владеет информацией о новой ячейке, но не о распределении ее каналов. И наконец, при процедуре третьего типа мобильная станция ничего не знает о новой ячейке. Однако она посылает старой ячейке сообщение о предстоящей замене на новую.

3.3.2. Дополнительные услуги

Система TETRA предоставляет пользователям немало дополнительных услуг. Часть из них введена в стандарт по заявке Ассоциации европейской полиции (Schengen Group), которая тесно сотрудничает с техническим комитетом ETSI, отвечающим за разработку TETRA. Так, специально для нужд служб общественной безопасности поддерживается режим, по которому вызовы поступают абонентам только при наличии санкции диспетчера. Существует система приоритетов доступа, действующая при перегруженности сети. Приоритеты

присваиваются и вызовам (в соответствии с приоритетом абонента). Группы пользователей могут создаваться и модифицироваться динамически. При групповом вызове предусмотрена идентификация вызывающей стороны. Кроме того, допускается избирательное прослушивание терминалов.

Поддерживаются и другие услуги. Пользователю предоставляется возможность задавать зоны вызовов — вызывной сигнал дойдет только до абонентов в пределах выбранных зон. По его желанию на терминале вызываемого абонента отображается идентификатор вызывающей стороны, и наоборот. В ходе сеанса связи пользователь получает информацию о попытке соединения с ним, а вызываемому абоненту сообщается о том, когда соединение возможно. Постоянно или при необходимости (номер абонента занят, не отвечает или находится за пределами зоны обслуживания) вызовы перенаправляются по другому номеру или по первому доступному номеру из списка абонентов, предоставленного пользователем. Предусмотрена возможность принимать вызовы и в процессе разговора. С помощью специальной опции разрешаются либо блокируются определенные категории входящих и исходящих вызовов, например междугородних. Немаловажно и то, что абонентам поступает информация об оплате услуг.

3.3.3. Защита информации

Защита информации — важнейший аспект построения системы TETRA, поскольку одной из основных групп пользователей являются службы общественной безопасности, для которых высокий уровень защиты — обязательное требование. Система защиты TETRA основана на трех принципах: структурированность, открытость и применение хорошо проверенных методов. Структурный подход к разработке и построению системы позволил сформулировать требования к защите (ETSI TETRA Technical Requirements Specification ETR 086-3) еще на этапе проектирования. На базе этих требований разработаны специальные функции и механизмы защиты, вошедшие в протоколы TETRA и составляющие с системой единое целое. Описание механизмов и алгоритмов системы защиты TETRA доступно всем желающим. Иными словами, защищенность информации не зависит от сохранения в секрете способа шифрования.

В стандарт вошли только хорошо проверенные методы защиты, в первую очередь из систем GSM и DECT. Это механизмы аутентификации мобильного терминала, обеспечение конфиденциальности радиоканала (GSM), а также взаимная аутентификация терминала с сетью и функции управления ключами кодирования (DECT).

Однако в стандарт включен и ряд других функций, обеспечивающих совместное соблюдение требований как GSM, так и DECT и не препятствующих быстрому установлению соединений и мобильности пользователей.

При рассмотрении средств защиты TETRA следует четко различать три класса функций:

- 1) механизмы защиты выполняют основную работу по обеспечению безопасности системы, реализуя такие функции, как идентификация пользователей и конфиденциальность информации. Это основные структурные блоки в системе защиты;
- 2) функции управления защитой управляют отдельными механизмами защиты, контролируя их непротиворечивость и корректность при взаимодействии разных сетей;
- 3) стандартные криптографические алгоритмы суть стандартизированные математические функции, обычно используемые в комбинации с ключами. Они реализуют адекватный уровень защиты в соответствии с применяемыми защитными механизмами. Эти алгоритмы, входящие в систему TETRA как опция, обеспечивают взаимодействие различных сетей.

Средства обеспечения законности снимают противоречия между национальными законодательными требованиями, которым должна соответствовать система связи, и системой защиты. Национальные законодательные акты соблюдаются без изменения и ухудшения работы внутренней защиты TETRA.

Один из основных элементов системы управления защитой — ключевые последовательности (ключи). Они применяются при процедурах аутентификации и шифрования информации.

Аутентификационный ключ используется для взаимного опознавания мобильного терминала и базовой станции. Применяются три вида таких ключей:

- 1) пользовательский аутентификационный ключ (UAK) длиной 128 бит, хранимый в памяти мобильной станции или Smart-карты;
- 2) аутентификационный код, вводимый пользователем вручную;
- 3) комбинация UAK и вводимого пользователем персонального идентификационного номера (PIN-кода).

При передаче сообщений защитой от несанкционированного прослушивания служит шифрование. Шифровальные ключи можно формировать, распределять, выбирать и отменять при установлении связи между абонентами. Используют четыре вида шифровальных ключей:

- 1) выведенные ключи применяются для двухточечной связи и генерируются при процедуре аутентификации;

- 2) статические ключи представляют собой набор фиксированных кодовых последовательностей (до 32), которые могут использоваться без предварительной аутентификации;
- 3) общий ключ используется для шифрования при передаче групповых вызовов, формируется с использованием выведенного ключа для каждой мобильной станции, действует в строго определенной зоне и периодически изменяется;
- 4) групповой ключ, связанный с определенной группой пользователей, генерируется системой и передается мобильным станциям заданной группы. Он применяется для шифрования вызовов группы как в исходном виде, так и после модификации посредством общего ключа.

ГЛАВА 4

ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

4.1. Краткий исторический экскурс

Телевидение — одна из важнейших областей применения технологий беспроводной высокоскоростной передачи данных. Первой ТВ-трансляцией по СПИ считают передачу телевизионного изображения президента США Герберта Гувера по телефонным линиям из Вашингтона в Манхэттен в 1927 г., организованную компанией Bell System.

Телевидение — еще и одна из наиболее «древних» областей электронной техники, по возрасту не уступающая радио. Работы в этом направлении начались еще до появления беспроводной связи. Основой для многих систем раннего, так называемого оптико-механического телевидения был созданный в 1884 г. и запатентованный в 1895-м немецким ученым Паулем Нипковым вращающийся перфорированный «развертывающий диск» из селеновых ячеек, раскладывающий изображение на элементы. В 20-х–30-х годах во всех странах работы в области телевидения, вплоть до попыток создания сетей вещания и цветного телевидения, были связаны именно с этим устройством.

Примечательно, что история создания и развития телевидения во всем мире неразрывно связана с отечественными специалистами. Так, сам термин «телевидение» вошел в оборот петербургский инженер Константин Дмитриевич Перский в 1900 г. на научной конференции в Париже. Определяющими для электронного телевидения стали работы профессора Петербургского технологического института Бориса Львовича Розинга с зеркальными способами оптико-механической развертки (1907–1911). Он использовал катодно-лучевую трубку англичанина Уильяма Крукса, причем механизм развертки принципиально не отличался от современного. Однако несовершенство первых электронных ламп и отсутствие усилителей не позволяли в то время получить приемлемое изображение. Но самое главное — Б.Л. Розинг основал научную школу, из которой вышло немало будущих создателей телевидения. Судьба Б.Л. Розинга типична для многих выдающихся россиян, оставшихся в России в 20-е годы, — арест в 1931 г. и смерть в ссылке в Архангельске.

Время с 1920 до 1930 г. — период бума в области систем механического телевидения малой строчности (порядка 30 строк). В США, Европе, СССР создаются так называемые малострочные ТВ-системы. Появляются первые приемники и видеокамеры. В 1931 г. в США насчитывалась уже 21 экспериментальная ТВ-станция, порядка 8 тыс. малострочных приемников. В Великобритании к 1931 г. было продано около тысячи ТВ-приемников Джона Лоджи Берда с разверткой в 30 строк. Постепенно число строк механических ТВ-систем перевалило сотню, но в середине 30-х годов все подобные системы начало вытеснять электронное телевидение.

Примечательно, что одну из наиболее совершенных систем с механической разверткой разработал гениальный российский инженер и профессиональный музыкант Лев Сергеевич Термен. Массовой публике он известен как создатель первого электромузыкального инструмента терменовокс. Однако еще в 1926 г. он построил установку телевизионного наблюдения с разрешением 64 строки, экраном 1,5 × 1,5 м и системой передачи изображения на 50 м (см. Радиолюбитель. 1927. № 1). Л.С. Термен продолжил работы над совершенствованием ТВ-системы наблюдения для пограничных войск с очень жесткими тактико-техническими требованиями. Так, число строк развертки превышало сотню, аппаратура должна была работать в полевых условиях и т. п. С помощью этого устройства К.Е. Ворошилов в 1927 г. наблюдал из своего кабинета за посетителями во дворе здания Наркомата обороны. К сожалению, продолжить деятельность в ТВ Л.С. Термен не смог — он стал активно сотрудничать с советской разведкой, в конце 20-х начинается его музыкальное турне с терменовоксом в Европе, закончившееся в США. Там он, по видимому продолжая разведывательную деятельность, организовал фирму Teletouch по производству терменовокса и различных его модификаций, создал первое цветомузыкальное устройство, самое главное — охранную систему (использовавшуюся даже в Форт-Ноксе). Стал миллионером. В 1938 г. был отозван (или был вынужден уехать) в СССР. Там его ждал лагерь, знакомство с С.П. Королевым на колымских золотых приисках, знаменитая «туполевская шарашка» в Омске, работа над системой радиоуправления беспилотных самолетов и подслушивающими устройствами. Умер Лев Сергеевич в 1993 г. в возрасте 95 лет в нищете и безвестности (в США о нем помнят до сих пор, снят документальный фильм «Электронная одиссея Льва Термена»).

Иначе сложилась судьба двух других россиян, которых в США называют «отцами телевидения». Речь идет о В.К. Зворыкине и Д.А. Сарнове. Давид Абрамович Сарнов, иммигрант из-под Минска, стал одним из ведущих инженеров у Г. Маркони. В 1912 г. прославился тем, что принял сигнал SOS с «Титаника» и в течение трех суток поддерживал радиосвязь с судами, спасшими часть

пассажиров. В 1930 г. стал президентом основанной Маркони компании Radio Corporation of America (RCA) и ее дочерней радиосети National Broadcasting Company (NBC). Его роль в развитии телевидения в США столь велика, что в 1944 г. на первом собрании только что созданного Общества телевизионных вещателей США именно Сарнову, тогда бригадному генералу, был присвоен титул «отца телевидения». Примечательно, что Д.А. Сарнов был личным советником практически всех президентов США, начиная с Вудро Вильсона.

В 1929 г. Д.А. Сарнов пригласил на работу в RCA Владимира Кузьмича Зворыкина — известного к тому времени в США специалиста в области создания электронных трубок, сотрудника компании «Вестингауз». За свою жизнь (1889–1982) В.К. Зворыкин стал обладателем 120 патентов (последние — в области управляемых ракет, компьютеров для предсказания погоды, электронных микроскопов и т. д.). В 1912 г. Зворыкин закончил Петербургский технологический институт, где познакомился с Б.Л. Розингом, и принимал участие в его работах над системами электронного телевидения. В 1919 г. эмигрировал в США, уже год сотрудничая с фирмой «Вестингауз». В США Зворыкин возобновил работы над телетехникой. Им разработан кинескоп. В 1931 г. в RCA он создает иконоскоп, преобразующий оптическое изображение объекта в электрический сигнал, и начинает работы над созданием телевизионной системы в целом. Примечательно, что одновременно с ним в СССР аналогичное изобретение сделано группой сотрудников Всесоюзного электротехнического института под руководством Семёна Исидоровича Катаева (приоритет заявки Катаева — на два месяца раньше, чем в патенте Зворыкина).

Регулярное электронное ТВ-вещание впервые началось в Европе. В Англии это произошло 2 ноября 1936 г. компанией BBC. Использовались одновременно две системы: механического ТВ Берда (240 строк) и электронные ТВ-системы компании «ЭМИ-Маркони» (405 строк). Последняя использовала практически скопированный иконоскоп Зворыкина, назвав его эмитрон. Это связано с тем, что руководитель телевизионной группы компании «ЭМИ-Маркони» Айзек Шенберг учился в Петербургском технологическом институте у Розинга, поддерживал тесный контакт со Зворыкиным. Между RCA и «ЭМИ-Маркони» было заключено соглашение об обмене научной информацией.

В Германии в 1931 г. Манфред фон Арденне продемонстрировал работу электронной системы телевидения со стандартом 100 строк. Тогда же появились и первые телевизоры с электронным кинескопом. С 15 января 1936 г. Берлинский телецентр начал ежедневные трансляции с разрешением 180 строк. Олимпиада в Берлине в ав-

густе 1936 г. транслировалась по 7–8 часов в сутки. Помимо индивидуальных телевизоров передачи можно было смотреть в 25 просмотровых залах Берлина, а также в Гамбурге, куда был проложен кабель. За Берлинской Олимпиадой по телевизору следило в общей сложности 150 тыс. человек.

В Соединенных Штатах вещание электронного ТВ началось 30 апреля 1939 г. компанией NBC с выступлений президента США Ф.Д. Рузвельта. В день начала передач в Нью-Йорке было всего 200 телевизоров. К концу 1941 г. в США насчитывалось уже порядка 7,5 тыс. цифровых телевизоров.

В СССР регулярное ТВ-вещание началось 10 марта 1939 г. на базе американского оборудования с разрешением 343 строки. С 16 июня 1949 г. началось вещание в современном стандарте 625 строк.

Сегодня мы переживаем очередную технологическую революцию в телевидении — начало массового распространения цифрового телевизионного вещания. Цифровое телевидение (ЦТВ) — это принципиально новые возможности, интерактивность, среда доставки мультимедийного трафика. Поэтому изменение формата ТВ-вещания — не просто сложная техническая задача, это — серьезнейший фактор, действующий в экономическом и социальном плане в общемировом масштабе.

4.2. Системы цифрового телевидения

Что дает цифровое телевидение? До массового зрителя практически без искажений доходит сигнал студийного качества, исчезают помехи, характерные для аналогового вещания. Появляется возможность передавать видеозображение телевидения высокой четкости (ТВЧ, HDTV) с числом строк развертки 720, 1080 (соотношение строк и столбцов 9:16) и выше против стандартных сегодня 480–625 строк (формат 3:4). Однако увидеть эту высокую четкость можно лишь на экране ТВ-приемника с соответствующими характеристиками кинескопа. Поэтому не менее важно, что ЦТВ позволяет гораздо эффективнее использовать спектральный диапазон — в полосе одного аналогового ТВ-канала можно формировать несколько цифровых, на порядок возрастает число одновременно доступных ТВ-программ. Наконец, развитие средств доставки цифрового телевизионного сигнала — важный шаг к столь интенсивно прорабатываемому сегодня «телевидению по запросу», когда зритель выбирает уже не канал, а непосредственно тот фильм или передачу, которые хочет смотреть.

Выделяют четыре основных механизма передачи ТВ-трафика конечным потребителям — кабельный, спутниковый, наземный (эфирное вещание) и так называемый сотовый. Последний метод реализуют высокочастотные системы с труднопроизносимыми аббревиату-

рами: MMDS (Multichannel Microwave Distribution System), LMDS (Local Microwave Distribution System), MWS (Multimedia Wireless System), работающие (в России) в диапазонах 2,5–2,7; 27,5–29,5 и 40,5–43,5 ГГц соответственно. Нас системы ЦТВ будут интересовать как пример широкополосных ВСШ, характерная особенность которых — выраженная асимметрия трафика. Более того, с появлением стандартов группы IEEE 802.16 становится возможным интегрировать и совместимые системы сотового телевидения. Российский зритель знаком (или вскоре познакомится) со спутниковым и кабельным ЦТВ. Однако стратегический вопрос развития телевидения в государстве — сеть наземного вещания. Остановимся на ней подробнее.

В области массового вещания столкнулись два стандарта передачи сигнала: ATSC (Advanced Television Systems Committee, США) и DVB (Digital Video Broadcasting, Европа). Отдельно стоит Япония со стандартом ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting). Противостояние американского и европейского стандартов, по крайней мере для России, уже вопрос прошлого, поскольку выбор в пользу DVB сделан, по всей видимости, окончательно. Эти стандарты аналогичны в том смысле, что оба ориентированы на передачу видео- и аудиоданных, кодированных и компрессированных посредством MPEG-2 [18]. Звук может кодироваться с помощью других алгоритмов, например Dolby AC-3. Поэтому качество картинки мало зависит от выбора одного или другого метода модуляции, если она успешно принята приемником.

В США при выборе стандарта цифрового телевизионного вещания основное внимание уделяли повышению качества изображения. При этом увеличение числа каналов со стандартным качеством изображения не рассматривалось. Очевидно, что изображение с высоким разрешением проявит себя на телевизорах с большим экраном — не меньше 32 дюймов, еще лучше — 55–60 дюймов. ТВ-приемники данного класса стоят соответственно 2–3 и 5–10 тыс. долларов, т. е. гораздо дороже привычных телевизоров.

В Европе при разработке цифровой телевизионной системы DVB учли печальный опыт десятилетней давности, связанный с развертыванием коммерческого телевизионного вещания высокой четкости, в основном аналоговой ТВЧ-системы MAC (Multiplexed analog components). Поэтому основное внимание уделили увеличению числа каналов со стандартной разрешающей способностью. Это позволило начать переход к ЦТВ с выпуска относительно дешевых (400–600 долларов) приставок для уже имеющихся телевизионных приемников. Кроме того, европейский стандарт рассматривается как основа для единой телекоммуникационной системы, ориентированной на передачу данных самой различной природы, отсюда требования к низкой вероятности ошибок. В то же время в ATSC отсутствует опция передачи дополнительных данных.

ATSC ориентирован на трансляцию в полосе шириной 6 МГц (стандартная ширина канала американской системы аналогового ТВ NTSC) одного потока со скоростью 19,28 Мбит/с при наземном вещании и двух таких потоков — в сетях кабельного телевидения. DVB гораздо гибче: в стандартной полосе 8 МГц он обеспечивает выбор скорости в диапазоне от 4,98 до 31,67 Мбит/с (возможна работа в регионах с каналами шириной 6 и 7 МГц). Соответственно изменяется и число ТВ-программ в этой полосе — от 16 до 2, причем возможна одновременная трансляция программы с низким разрешением, но высокой надежностью и высоким разрешением при пониженной надежности приема. Уникальная особенность DVB — это мобильность приемника, он может перемещаться со скоростью до 300 км/ч — это поезда, междугородний пассажирский автотранспорт, мобильные службы (скорая помощь, полиция) и т. п.

Однако самое существенное — это надежность доставки сигнала, в чем ATSC уступает DVB. Причиной этого является принятая в ATSC многопозиционная амплитудная модуляция с частично подавленной боковой полосой 8-VSB (vestigial-sideband modulation system for broadcast). В целом 8-VSB можно назвать вершиной технической реализации систем амплитудной модуляции с подавлением боковой полосы. Но по сравнению с DVB в реальных условиях этот механизм проигрывает по надежности, гибкости, требованиям к приемным антеннам. Рассмотрим конкурирующие стандарты подробнее.

4.3. Стандарт ATSC

ATSC разрабатывался с учетом того, что какое-то время в одном диапазоне будут транслироваться сигналы как в стандарте ATSC, так и в действующем в США аналоговом стандарте NTSC. Постепенно NTSC должен быть вытеснен, и весь занятый аналоговым вещанием диапазон станет цифровым. В отличие от ATSC, спектр NTSC достаточно неравномерен. Поэтому для борьбы с интерференционными помехами в ATSC предусмотрен режекторный гребенчатый фильтр с подавлением основных составляющих сигнала NTSC (яркость, цвет и звук). Однако данный фильтр вдвое ухудшает для приемника соотношение сигнал/шум, поэтому он включается, только если приемник обнаруживает в эфире NTSC-сигнал.

Очень кратко рассмотрим систему VSB, принятую в ATSC. VSB — это амплитудная модуляция с подавлением нижней боковой полосы и частичным подавлением несущей. Уровней модуляции может быть от 2 (2-VSB) до 16 (16-VSB), они располагаются симметрично относительно 0. Так, амплитуда сигнала в 8-VSB принимает значения, пропорциональные целым числам от -7 до 7 с шагом 2. Для

кабельного вещания принята наиболее быстрая система 16-VSB, для наземного — 8T-VSB с предварительным решетчатым (сверточным) кодированием со скоростью $2/3$ (T — от trellis, решетка).

На вход VSB-системы поступают пакеты MPEG-2 объемом 188 байт (рис. 4.1). Из них удаляется байт синхронизации, к оставшимся 187 байтам добавляется 20 проверочных байт кода Рида-Соломона. Дополнительно включенный в 8T-VSB, решетчатый кодер превращает каждые 2 бита получившегося 207-байтного слова в 3 бита, т. е. в один символ. Очевидно, что скорость передачи данных пропорциональна двоичному логарифму от числа уровней амплитудной модуляции (число бит на символ), однако, чем больше уровней, тем ниже помехозащищенность. Частота следования символов в VSB — 10,76 МГц. В результате скорость в системе 16-VSB, где каждым 4 битам соответствует один символ, в 2 раза выше (38,6 Мбит/с), чем в 8T-VSB (19,3 Мбит/с), поскольку для передачи одного пакета требуется вдвое меньше символов. Однако и пороговый уровень соотношения сигнал/шум у данных систем соответственно 28,3 и 14,9 дБ.

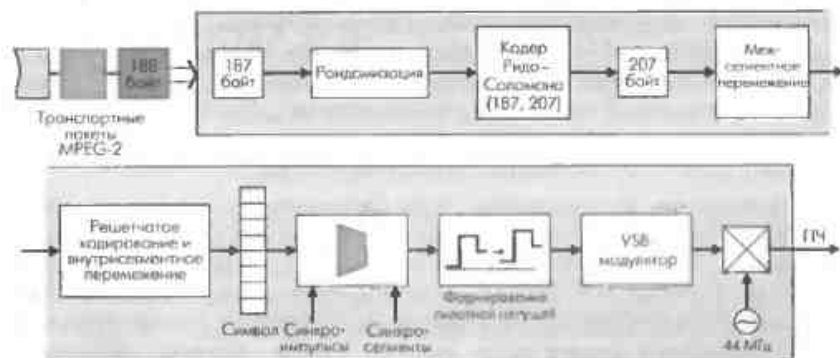


Рис. 4.1. Формирование сигнала в системе 8T-VSB

В итоге в 8T-VSB каждый байт превращается в 4 символа, 207 байт кодированного пакета — в 828 символов. Вместо синхробайта MPEG-2 используется синхросигнал (бросок амплитуды с уровня 5 до уровня -5) длительностью 0,37 мкс, что соответствует 4 символам. Получившиеся $828 + 4 = 832$ символа образуют сегмент. Каждые 312 сегментов данных и дополнительный синхросегмент объединяются в поле данных, два поля данных — в кадр (626 сегментов). Синхросегмент содержит ряд опорных последовательностей для настройки корректоров приемника, информацию о числе уровней модуляции и (только в 8T-VSB) 12 последних символов предшествующего сегмента.

Перед поступлением на вход кодера Рида-Соломона данные входного потока рандомизируют — превращают в псевдослучайные чис-

ла. Для этого каждый байт входного потока побитно складывается по модулю 2 с циклической псевдослучайной последовательностью. Генератором этой последовательности служит сдвиговый регистр из 16 триггеров, охваченный набором обратных связей. Во время синхронимпульса первого сегмента данных каждого поля в регистр загружается число $F180_{16}$. Восемь выходов регистра формируют поток байтов псевдослучайной последовательности. В результате сигнал становится практически независимым от изображения и шумоподобным, его спектральная плотность равномерно распределяется по полосе. Кроме повышения спектральной эффективности улучшается и синхронизация передачи: поскольку уровни модуляции симметричны относительно 0, а амплитуды информационных символов достаточно случайны, средний уровень сигнала также близок к 0. На этом фоне легко детектировать периодически повторяющийся синхронимпульс и синхросегмент, даже при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Поскольку средний уровень информационных сигналов близок к 0, амплитуда несущей при амплитудной модуляции также была бы нулевой. Но несущая в качестве пилот-сигнала необходима в данной системе для восстановления синхронизации в приемнике, поэтому вводят смещение — уровень каждого сигнала данных увеличивают на 1,25 единицы. Это соответствует появлению маломощного периодического сигнала несущей, добавляющего лишь 0,3 дБ к общей мощности сигнала. Данного уровня достаточно для детектирования несущей даже при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Кодирование по алгоритму Рида-Соломона защищает информацию от кратковременных помех (до 10 ошибочных байт на 207-байтное слово). В случае длительных помех этот механизм сам по себе бессилён. Поэтому в VSB введено межсегментное перемежение — после кодера Рида-Соломона все байты одного пакета распределяются по 52 сегментам одного поля данных. Таким образом, даже если сегмент пропал, после деперемежения в каждом пакете окажется незначительное число поврежденных байтов, которые восстановятся декодером. Механизм перемежения используется и после решетчатого кодирования (в 8T-VSB), в результате которого последовательные символы оказываются отстоящими друг от друга на 12 символов — внутрисегментное перемежение. После внутрисегментного перемежения в сегменты вводят синхросигналы и добавляют синхропакеты полей, после чего смещают на 1,25 уровень сигналов данных для включения пилотной несущей. Столь сложным сигналом модулируется несущая на промежуточной частоте (ПЧ) 44 МГц, которая затем переносится непосредственно в полосу заданного телеканала.

К сожалению, имея лучшие теоретические показатели пороговых соотношений сигнал/шум и энергетической эффективности сигнала (на бит информации) [5], ATSC недостаточно надежен при много-

лучевом распространении сигналов, что неизбежно в условиях городской застройки. При этом отраженный сигнал, пришедший с задержкой, уже является помехой по отношению к основному. И если уровень отраженного сигнала менее чем на 15 дБ отличается от прямого, приемник теряет работоспособность — появляются помехи. То же самое относится и к приему сигналов от двух передатчиков. Поэтому заявленный выигрыш систем ATSC по отношению к DVB по показателю сигнал/шум в 4–6 дБ может проявиться разве что в лабораторных условиях. Практика же показывает, что в Нью-Йорке передатчик ATSC мощностью 350 кВт не обеспечивает 100% приема в радиусе 10 км, тогда как в Лондоне достаточно передатчика DVB-T мощностью 10 кВт для уверенного приема в радиусе 114 км [15]. Приходится усложнять антенные системы, что, очевидно, пользователей не радует.

4.4. Стандарт DVB

DVB, принятый в Европе, — это набор спецификаций, охватывающий кабельное DVB-C (cable), спутниковое DVB-S (satellite) и наземное DVB-T (terrestrial) вещание. Наиболее сложный алгоритм — в DVB-T, поскольку условия работы и требования к передаче при наземном вещании наиболее жесткие. Очень кратко остановимся на наиболее примечательных особенностях DVB.

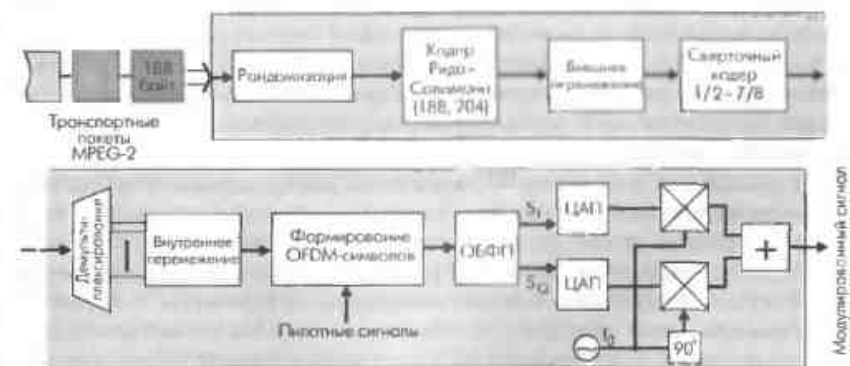


Рис. 4.2. Формирование сигнала в системе DVB-T

Предварительная обработка пакетов в DVB в принципе аналогична 8-VSB, хотя механизмы реализации функций различны. На вход кодера поступают транспортные пакеты MPEG-2 по 188 байт (1 синхробайт (всегда 47_{16}) + 187 байт данных) (рис. 4.2). Прежде всего, они рандомизируются посредством сложения по модулю 2 с двоич-

ной псевдослучайной последовательностью (генератор — 15-разрядный сдвиговый регистр). Генератор инициализируется через каждые восемь пакетов одним и тем же числом ($4B80_{16}$). Синхробайты не рандомизируются, каждый восьмой синхробайт инвертируют.

После рандомизации пакеты защищают кодом Ридда-Соломона, в результате чего к 188 байт добавляются 16 проверочных — возможно исправление до восьми ошибочных байт на кодированный 204-байтный пакет. Затем байты перемешиваются внутри кодированных пакетов, причем так, что синхробайты остаются на своих местах, — это внешнее перемежение. Затем следует внутреннее сверточное кодирование. Его реализует сдвиговый регистр из шести триггеров, превращающий каждый входной бит в два выходных (скорость кодера 1/2). В DVB можно выбирать скорость сверточного кодирования (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8), используя не оба элемента выходных пар, а лишь один. До сих пор функционально все было аналогично системе 8-VSB. Дальше начинаются принципиальные различия, связанные с модуляцией радиосигнала.

В стандарте использована модуляция COFDM (Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) — вариант мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM) с предварительным кодированием сигнала. Модуляция OFDM подразумевает, что весь диапазон канала вещания (в Европе — 8 МГц) разбит на множество ортогональных поднесущих. Ортогональность означает, что усредненное по времени произведение двух несущих равно нулю. Частоты поднесущих задаются как $f_n(t) = \cos 2\pi(f_0 + n/\tau)t$, где f_0 — нижняя частота диапазона; n — номер поднесущей ($n = 0 \dots N - 1$; N — число поднесущих); τ — временной интервал передачи одного символа. Поток данных разбивается на N субпотоков, несущая каждого из которых модулируется с гораздо меньшей скоростью. Разнос несущих по частоте равен $1/\tau$.

Поскольку в отдельном субканале скорость передачи велика, перед каждым символом можно ввести защитный интервал — временной отрезок до $0,25\tau$, в течение которого транслируется фрагмент уже переданного символа (для сохранения ортогональности несущих). Основное назначение защитных интервалов — борьба с межсимвольными помехами, вызванными в том числе и переотражениями сигналов. Действительно, поскольку скорость символов мала, переотраженный сигнал в приемнике «накладывается» на прямо распространяющийся сигнал в интервале одного символа, а не следующего, попадая в защитный интервал.

Независимая (ортогональная) многочастотная передача с защитными интервалами позволяет успешно противостоять как мощным узкополосным помехам, так и переотраженным сигналам, причем методами цифровой обработки. В системе передачи с одной несущей

VSB основное средство борьбы с аддитивными помехами — эквалайзер, однако при полном подавлении несущей сигнал восстановить уже невозможно. При многочастотной передаче «пропадут» только сигналы, попавшие в полосу помехи. Поскольку сигнал кодирован, информацию можно восстановить по данным из других субканалов.

В DVB в одном канале (при принятой в Европе ширине ТВ-канала 8 МГц) может быть до 8 тыс. несущих (учитывая требования алгоритмов обработки, $8 \times 1024 = 8192$ или 8К). Реально задействовано 1705 (режим 2К COFDM) или 6817 (режим 8К) несущих. Каждая несущая модулируется посредством 4-позиционной квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или 16- и 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Соответственно на каждой несущей один модуляционный символ определяет от 2 до 6 бит.

Напомним, что при квадратурной модуляции выходной сигнал формируется сложением двух смещенных друг относительно друга на 90° гармонических колебаний на одной частоте f — синфазного $S_I(t) = A_S \cos \omega t$ и квадратурного $S_Q(t) = -A_Q \sin \omega t$ ($\omega = 2\pi f$). Их сумма — исходное колебание с фазовым сдвигом на угол $\varphi = \arctg(A_Q/A_S)$:

$$A_S \cos \omega t - A_Q \sin \omega t = A \cos(\omega t + \varphi); \quad A = \sqrt{A_S^2 + A_Q^2}.$$

В соответствии с числом уровней модуляции исходный поток данных разбивается на n субпотоков — по числу бит в модуляционном символе. Для QPSK таких субпотоков два, для 16-QAM — четыре. Демультимплексирование происходит побитно — скажем, при модуляции 64-QAM ($n = 6$) первый бит попадает в первый субпоток, шестой — в шестой, седьмой — снова в первый и т.д. В DVB в каждом субпотоке биты переставляются по определенному правилу (своему для каждого субпотока) в пределах блока в 126 бит — внутреннее перемежение. Параллельные выходы устройств перемежения формируют модуляционный символ: 2-, 4- или 6-разрядный. На одной несущей OFDM передается один символ, поэтому в режиме 8К одновременно транслируется 48 групп по 126 символов — всего $48 \times 126 = 6048$ информационных несущих (или 12 групп по 126 символов на 1512 несущих в режиме 2К). Одновременно передаваемые QAM-символы входят в OFDM-символ. Они распределяются по субканалам OFDM не последовательно, а опять-таки перемежаются по определенному закону. Поэтому, если OFDM-символ пропадает, его данные можно восстановить, поскольку биты одного кодированного пакета оказываются распределенными по многим OFDM-символам.

Очевидно, что реализовать метод передачи OFDM «в лоб», т.е. использовать несколько тысяч генераторов модулированных подне-

сущих, весьма проблематично. А на приемной стороне это и во все неразрешимая задача. Однако современные методы цифровой обработки сигнала позволяют существенно упростить ее решение, используя отработанные алгоритмы прямого и обратного быстрого преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ). Как это происходит?

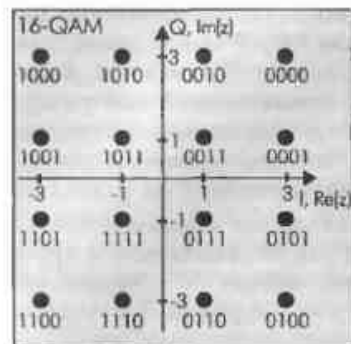


Рис. 4.3. Векторная диаграмма 16-QAM

Рассмотрим для примера векторную диаграмму модуляции 16-QAM (рис. 4.3). Каждая точка на ней соответствует четырем битам символа и определяет амплитуды синфазного (абсцисса) и квадратурного (ордината) колебаний. Складываясь, эти колебания задают соответствующий символу сигнал. Если применять математический аппарат комплексных чисел, ось квадратурных амплитуд будет соответствовать оси мнимых чисел (Im), ось синфазных амплитуд — оси действительных чисел (Re). Тогда любой символ можно представить как комплексное число $z = A_S + iA_Q$ или, по формуле Эйлера, $z = Ae^{i\varphi}$. В DVB используют не сами z , а их значения, нормированные на среднюю амплитуду суммарного колебания при выбранном виде модуляции. Это необходимо для усреднения амплитуд сигналов при различных режимах модуляции (очевидно, что при QPSK нормирующий множитель $c = 1/\sqrt{2}$, тогда как при 16-QAM $c = 1/\sqrt{10}$).

Запишем в комплексном виде модулированный символом $C_k(t)$ сигнал на k -й несущей (без ее переноса в диапазон вещания): $S_k(t) = C_k(t)e^{i2\pi kt/\tau}$. Учитывая, что сигнал изменяется дискретно, т. е. $t = nT$, где T — длительность дискретного интервала; n — номер отсчета, получим $S_k(nT) = C_k(nT)e^{i2\pi knT/\tau}$. Тогда общий сигнал OFDM-символа

$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} C_k(nT)e^{i2\pi knT/\tau}. \quad (4.1)$$

Математически это аналогично вычислению дискретных значений функции по дискретным значениям амплитуд (C_k) ее гармонических составляющих (с частотами k/τ). Данную процедуру описывает ОПФ:

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{i2\pi kn/N}, \quad (4.2)$$

где N — число гармонических составляющих, в нашем случае — число несущих. Если длительность интервала дискретизации T выразить как τ/N , выражение (4.1) станет аналогичным ОПФ (4.2). Алгоритмы БПФ, как прямого, так и обратного, достаточно хорошо проработаны, в том числе и с точки зрения их аппаратной реализации. Они наиболее эффективны при N вида 2^m . Поэтому в 8K-COFDM число несущих условно принято равным $2^{13} = 8192$ — просто не все из них используются. Величина $1/T = N/\tau$ — это так называемая системная тактовая частота, для полосы канала в 8 МГц она равна $64/7$ МГц. При переходе к другому частотному плану, например с полосой ТВ-канала 7 или 6 МГц, достаточно изменить системную тактовую частоту, сохраняя неизменной всю структуру обработки сигнала (вместе с ней — основные функциональные устройства). Отметим, что системная тактовая частота одинакова в режимах 2К и 8К, т. е. от числа несущих скорость передачи напрямую не зависит, изменяется только надежность.

Таким образом, посредством ОБПФ из входного массива модуляционных символов численно формируется выходной OFDM-символ. Временной интервал его передачи складывается из собственно времени передачи символа τ и защитного интервала длительностью до $\tau/4$, в течение которого «повторно» передается часть символа (заклучено в кавычки, поскольку защитный интервал следует перед информационным). Отметим, что кроме 6048 (в режиме 8К) информационных субканалов он включает еще пилотные сигналы, а также сведения о параметрах передачи — всего 6817 модулированных несущих. Пилотные сигналы — это фиксированные псевдослучайные последовательности с точно известными значениями фаз и амплитуд сигналов. Одна часть пилотных сигналов — непрерывные — передается на фиксированных несущих в каждом OFDM-символе, другая — распределенные — случайным образом (но равномерно) в произвольные моменты времени распределяется по спектральному диапазону передачи. Назначение пилотных сигналов — синхронизация и оценка параметров канала передачи.

Синтезировать OFDM-символы недостаточно, необходимо еще сформировать радиосигнал в заданной частотной области (с нижней частотой f_0). Перенос символа в необходимый диапазон — это его смещение на частоту f_0 , что в комплексной форме эквивалентно умножению на комплексное (в виде квадратурных слагаемых) представление несущей f_0 . При этом амплитуды перемножаются, а аргументы складываются. Выделяя действительную (синфазную) и мнимую (квадратурную) составляющие $S(n)$ и умножая их соответственно на $\cos(2\pi f_0 t)$ и $-\sin(2\pi f_0 t)$, после суммирования получим полный сигнал одного OFDM-символа.

Описанные механизмы позволяют очень гибко выбирать необходимый режим вещания, а также совмещать два потока пакетов MPEG-2 — с высокой и низкой скоростью. Возможную скорость определяют вид модуляции, скорость сверточного кодирования (СК), величина защитного интервала T_3 ($\tau/4$, $\tau/8$, $\tau/16$, $\tau/32$). Учитывая, что при 8K-OFDM $\tau = 896$ мкс, скорость изменяется в пределах от 4,98 Мбит/с (QPSK, СК = 1/2, $T_3 = \tau/4$) до 31,67 Мбит/с (64-QAM, СК = 7/8, $T_3 = \tau/32$).

Мы чрезвычайно схематично рассмотрели принцип передачи сигнала в DVB-T. Однако сигнал надо еще принять, демультимплексировать и декодировать, что сложнее, чем синтезировать его в передатчике. Для этого дополнительно к алгоритмам передатчика применяют корреляционные детекторы, декодеры с алгоритмом Витерби и т. д. Причем приемное устройство должно быть компактным и недорогим, иначе кто же его купит. Транспортные пакеты MPEG-2 также надо декодировать и сформировать ТВ-сигнал — цифровой или аналоговый, в зависимости от типа телевизора. Поэтому ЦТВ-приемник — это достаточно сложный программно-аппаратный комплекс, и только технологические достижения последних лет позволяют делать его недорогим при массовом выпуске.

На рынке уже появились DVB-T ресиверы в однокристальном исполнении, пример тому — ИС DVB-T-ресивера SQC 6100 компании Infineon. Данная ИС поддерживает практически все режимы DVB-T (2K/8K-COFDM; ТВ-канал 6, 7 и 8 МГц, все скорости сверточного кодирования и методы модуляции). Ее применение делает приемник DVB-T конструктивно простым (рис. 4.4). Аналоговый сигнал с антенны принимает ИС тюнера типа TUA 60xx. Он усиливает, фильтрует нужный ТВ-канал и преобразует его сигнал к первой ПЧ (36,125 МГц). После ПАВ-фильтра сигнал преобразуется смесителем (например, TDA 6190) ко второй ПЧ (7,225 МГц) и далее попадает на демодулятор SQC 6100. На выходе эта ИС формирует поток транспортных пакетов MPEG-2.



Рис. 4.4. DVB-T-приемник на базе ресивера SQC 6100

4.5. Переход к цифровому телевизионному вещанию

Первые наземные передачи ЦТВ и ТВЧ в США начались еще в 1997 г. По требованию Федеральной комиссии по связи (FCC) к маю 2002 г. все коммерческие станции должны были перейти на передачу с использованием цифровых сигналов, для некоммерческих станций этот срок сдвинули на один год. К концу 2006 г. все станции должны прекратить аналоговое вещание. Так изложено на бумаге. В действительности в США с цифровым телевидением ситуация не слишком радужная.

В отличие от происшедшего в 60-е годы перехода на цветное телевидение, сигналы которого можно было припимать и на черно-белые приемники, сигнал ЦТВ аналоговый телевизор не воспринимает — необходим либо новый цифровой ТВ-приемник, либо цифровая принимающая приставка к аналоговому. Устройства эти, даже по американским меркам, не дешевые, например, крупный магазин бытовой электроники в Нью-Йорке предлагает приемники ТВЧ Panasonic по цене от 1500 до 2800 долларов. Около 650 долларов стоит ЦТВ-приставка Thomson. И хотя в стране уже более 170 телевизионных станций вещают в стандарте ATSC, продано всего лишь около 625 тыс. ЦТВ-приемников [53]. И это несмотря на то, что производством и поставками ЦТВ-приемников в США занимаются свыше 30 фирм, а парк аналоговых телевизоров в стране оценивают на уровне 300 млн [21]. Поэтому телекомпании как эфирного, так и кабельного вещания не спешат переходить на цифровой формат. А еще более усугубляет ситуацию конкуренция и видимые преимущества европейского стандарта DVB, который уже давно вышел за пределы Старого Света.

Проблема усложняется и тем, что телезрители так и не получили обещанного высокого качества. Вернее, качество картинки высокое, однако надежность ее доставки оставляет желать лучшего. В этой связи в 1999 г. представители 761 ТВ-станции США высказали озабоченность по поводу относительно низкого качества передаваемых ТВ-сигналов. Американская венчурная компания Sinclair Broadcasting Group — владелец наибольшего в США числа лицензий на ТВ-вещание — направила в FCC доклад с призывом отказаться от принятой в ATSC модуляции 8-VSB и принять европейскую систему модуляции COFDM. Уже более 400 компаний объявили о поддержке этого доклада. Более того, Министерство обороны США высказало свою обеспокоенность низким (по сравнению с COFDM) качеством приема на портативные приемники 8-VSB-сигнала, что может оказаться существенным при объявлении общенациональной тревоги и в других чрезвычайных ситуациях. Поэтому Пентагон настаивает

на внедрении COFDM в стандарт ATSC. Затянувшееся состояние неопределенности отнюдь не способствует развитию ЦТВ в США.

В Великобритании ситуация с цифровым телевизионным вещанием иная. Всего через два года после начала в ноябре 1998 г. внедрения системы DVB 8 из каждых 10 домов уже находились в зоне действия наземного передатчика ЦТВ и могли принимать сигналы на антенну на крыше дома. Адаптеры — приставки для имеющихся телевизионных приемников — гораздо дешевле телевизоров стандарта ATSC, поэтому операторы платного телевидения предоставляют их телезрителям бесплатно. Около 6 млн домов — порядка 20% общего их количества в Великобритании — принимают сигналы цифрового телевидения как от наземных станций платного телевидения (1 млн домов), так и от спутниковой системы SkyB (5 млн домов). Прекращение аналогового ТВ-вещания в Великобритании может начаться уже в 2006 г. и закончиться к 2010 г. Однако, по мнению независимой телевизионной комиссии ГТС, хотя страна и является мировым лидером в данной области, даты перехода от аналогового телевизионного вещания к цифровому пока еще называть рано.

В развитии наземного цифрового телевизионного вещания остальная Европа отстает от Великобритании. Практически все европейские страны выражают намерение начать запуск DVB-систем в ближайшие два года. DVB-T вещание уже разрабатывается в Швеции, Испании, Финляндии и Дании, однако с меньшим успехом, поскольку адаптеры DVB-T там бесплатно не предоставляют. В Нидерландах внедрению DVB-T препятствует широко развитое кабельное телевидение.

За пределами Европы интерес к ЦТВ также велик. Канада и Мексика решили использовать систему ATSC, однако пока ожидают результатов сравнительных испытаний COFDM и 8-VSB. Аналогичная ситуация в Аргентине, Южной Корее и на Тайване. В Китае и Гонконге проводится сопоставление ATSC и DVB. Индия и Сингапур приняли DVB, но со звуковым стереосопровождением Dolby Digital surround system вместо MPEG. Австралия планирует использовать DVB, однако с изображениями высокой четкости и Dolby Digital. Сторонниками европейского стандарта выступают Нигерия и ЮАР.

Япония, подобно Европе, вначале пошла по пути развития аналогового телевидения со своим спутниковым 1125-строчным телевидением высокой четкости Hi Vision. Теперь же в Японии разрабатывается цифровая система ISDB — во многом аналогичная DVB. В ISDB используется модифицированная форма COFDM с несколькими тысячами субканалов в 13 группах, несущих телевизионный сигнал с различной разрешающей способностью. В хороших условиях приема все группы принимаются и качество изображения наилучшее. Когда прием плохой, разрешающая способность снижается, однако

качество изображения все же лучше, чем у обычного телевизионного вещания. Такой адаптивной деградации качества изображения у систем ATSC и DVB нет: там изображение либо заданного качества, либо вовсе отсутствует. В Японии выбрана иная система звукового сопровождения — AAC (Advanced Audio Coding — перспективное кодирование аудиосигналов), предложенная германским Институтом им. Фраунгофера (одним из разработчиков стандарта MPEG), а также компаниями Dolby, Sony и AT&T. AAC позволяет вдвое уменьшить скорость передачи аудиоданных без потери качества. Япония призывает страны, которые не приняли систему ATSC или DVB, принять систему ISDB. Однако Сингапур после сравнительных испытаний выбрал европейский стандарт.

С системой цифрового телевидения жители России знакомы благодаря системе спутникового вещания «НТВ плюс» — с февраля 1999 г. она транслирует цифровые программы в стандарте DVB-S. Известны проекты кабельного телевидения (в стандарте DVB-C), прежде всего компаний «Комкор» и «МТУ-Информ». Опытное вещание в стандарте DVB-T началось в Нижнем Новгороде 2 июня 2000 г. При этом использовались DVB-T-модулятор компании TANBERG Television (Великобритания), кодер MPEG-2 и мультиплексор НИИ телевидения, а также передатчик «Онега 0.5Ц» АО ОТ «МАРТ» (Санкт-Петербург). Приемником служила DVB-приставка фирмы Nokia [2].

В целом развитие ЦТВ в России сдерживает не только отсутствие современной элементной базы [14]. Нет четкой государственной политики в области развития ЦТВ, если, конечно, не принимать за таковую ряд деклараций о намерениях, материально, увы, не подкрепленных. Иных преград для развития цифрового вещания в стране, где, по разным оценкам, от 60 до 85 млн телевизоров, не усматривается. Ведь нельзя же считать преградой отсутствие собственной элементной базы ЦТВ — практически весь мир использует не только импортную элементную базу, но и устроитесь на ее основе. Тем более что технологические проблемы вполне преодолимы — желающих производить по документации заказчика миллионные объемы ИС с самыми современными технологическими нормами сегодня достаточно. Наземное эфирное вещание, в отличие от кабельного и даже спутникового, — прерогатива именно государства, и без активных действий со стороны соответствующих государственных учреждений зоны опытного вещания такими и останутся.

Переход на ЦТВ в России — раньше или позже — неизбежен. Наша страна — пока открытый рынок для производителей аппаратуры ЦТВ. Кто его займет?

ГЛАВА 5

ЦИФРОВОЕ РАДИОВЕЩАНИЕ

Задачи создания системы радиовещания, обеспечивающей в приемнике качество звучания, близкое к оригиналу, — заветная мечта не одного поколения радиоинженеров. Сегодня она становится реальностью благодаря технологическому чуду конца прошлого века — возможности массового производства устройств с процессорами цифровой обработки аналоговых сигналов.

Серьезный инструмент повышения качества передаваемого аудиосигнала — цифровые форматы записи. Но возникает проблема. Как известно, качество записи на CD, рассматриваемое как эталонное, — это 16-разрядная линейная оцифровка аналогового сигнала с частотой выборки 44,1 кГц на один канал. Современные алгоритмы компрессии способны сжать этот поток 1,5 Мбит/с более чем в 10 раз. Например, Musicam, ставший основой для знаменитого MPEG Audio Layer 2, — до 192 кбит/с. Чтобы транслировать такой поток, нужна достаточно широкая спектральная полоса. Где ее взять, и не одну, поскольку программ вещания достаточно много?

Единого подхода к решению подобной проблемы нет. На сегодня в мире сложились три основные технологии цифрового радио. Это европейская система Eureka-147, продвигаемая в США концепция IBOC и система низкочастотного (до 30 МГц) цифрового вещания DRM.

5.1. Система Eureka-147

История европейского стандарта цифрового вещания (Digital Audio Broadcasting — DAB) началась в 1987 г. — с официальной даты рождения проекта Eureka-147. Разумеется, работы в области цифрового радио велись и до этого, например, одной из составных частей нового стандарта стала разработка германского института IRT (Institut für Rundfunktechnik) 1981 г. В 1988 г. в Женеве на Всемирной административной радиоконференции (WARC — World Administrative

Radio Conference) уже демонстрировался первый образец оборудования для мобильного приема. В феврале 1995 г. был опубликован европейский стандарт ETS 300 401, его вторая редакция вышла в марте 1997 г. Однако чаще его называют по имени проекта Eureka-147. Впоследствии, в 2000 и 2001 г., спецификация ETS 300 401 уточнялась. Уже с 1995 г. в европейских странах началось *опытное* цифровое вещание, с 1997 г. — опытная коммерческая трансляция DAB-программ.

Что такое Eureka-147? В его основе [52] два механизма: кодирование аудиосигнала по методу Musicam (MPEG Audio Layer 2, используемое в известных стандартах MPEG 1 и 2) и разделение каналов посредством ортогональных несущих (OFDM), как в уже рассмотренной нами европейской системе цифрового телевидения DVB [12]. Общая схема передачи достаточно стандартна для современных коммуникационных технологий (рис. 5.1): аудиосигнал сжимается MPEG-кодеком, к нему добавляются информационные данные (название программы, курс валюты, прогноз погоды и т. п.) и служебная информация. Вся информация кодируется — сначала выравнивается (рандомизируется) амплитуда сигнала посредством умножения на заданную псевдослучайную последовательность, затем применяется сверточное защитное кодирование, после чего происходит временное перемежение информации. Кодированные таким образом каналы мультиплексируются в один основной сервисный канал. К пакетам этого канала добавляется служебная информация — параметры мультиплексирования, информации о кодировании и т. д. Вместе с пакетами синхронизации вся информация образует кадр передачи, который транслируется посредством нескольких OFDM-символов (терминология стандарта ETS 300 401). OFDM-символ после квадратурной модуляции и обратного быстрого фурье-преобразования представляет собой сигнал, которым можно непосредственно модулировать радионесущую. Полный сигнал эквивалентен низкоскоростной модуляции большого числа (от 1536 до 192) ортогональных несущих. Схема аналогична телевизионному цифровому стандарту DVB.

В полосе 1,536 МГц транслируется цифровой поток порядка 1,5 Мбит/с. Передача возможна в четырех режимах: моно, двухканальном моно, стерео и объединенном стерео (joint stereo). В последнем случае высокочастотные составляющие (выше 2 кГц) стереосигнала передаются в одном потоке, без разделения.

Кодек MPEG Audio Layer 2 предусматривает два режима кодирования аудиосигнала: с частотой выборки 24 и 48 кГц (от 8 до 160

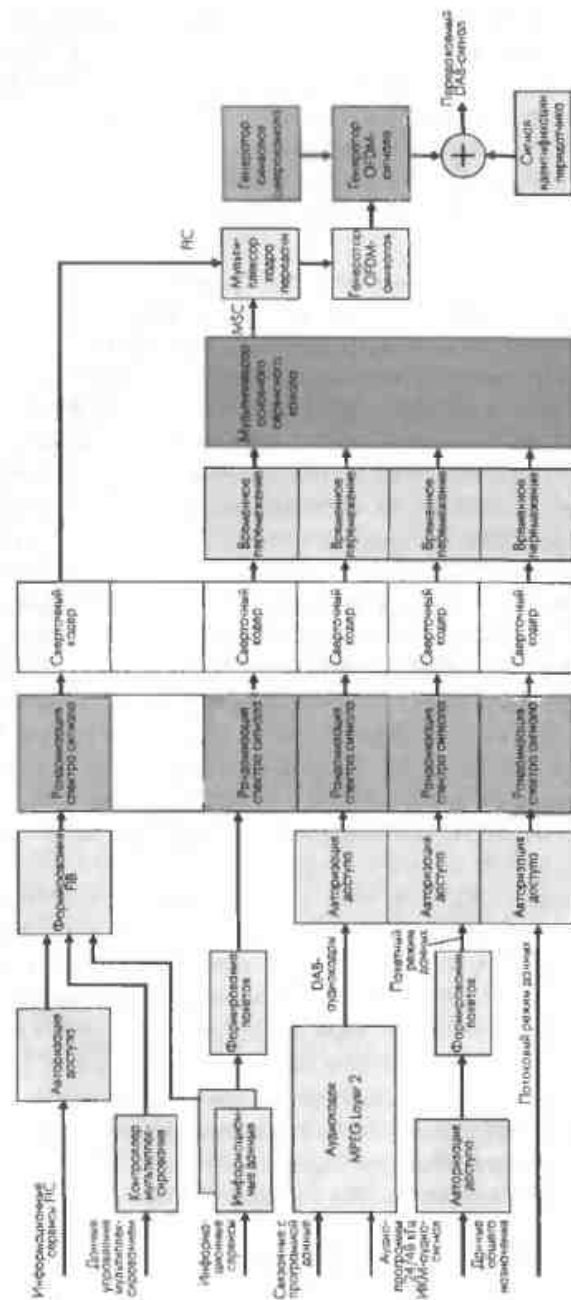


Рис. 5.1. Функциональная схема передатчика узла стандарта ETS 300 401 (Eureka-147)

и от 32 до 384 кбит/с). Соответственно с частотой выборки исходный сигнал кодируется в диапазоне 11,3 и 20,3 кГц. Максимальная разрядность выборки 16 бит. В соответствии с алгоритмом весь частотный диапазон делится на 32 одинаковых субканала. В каждом из них разрядность оцифровки сигнала (импульсно-кодовой модуляции — ИКМ) определяется на основе психоакустической модели восприятия, в соответствии с которой восприимчивость уха к различным частотам неодинакова, следовательно, различна и разрядность кодирования. Кроме того, возможен и учет маскирования сигнала в одной полосе сигналом в другой, но это требует достаточно громоздких вычислений. Не углубляясь в механизм кодирования, отметим, что на выходе кодека формируется поток так называемых DAB-аудиокадров, включающих 1152 ИКМ-выборки аудиоинформации, связанные с ней данные и служебную информацию. Общая длительность кадра 24 мс при частоте сканирования 48 кГц. Значения выборок в каждом субканале нормируются с помощью так называемого фактора масштабирования (Scale Factor, SF), одинакового для каждого 12 выборок. Число битов в каждой выборке различно и зависит от номера субканала, выбранной скорости сжатия и частоты сканирования. Число битов в выборке субканала, фактор масштабирования и другая служебная информация передается в полях Bit allocation, SF, SCFS, а также в заголовке кадра (рис. 5.2).

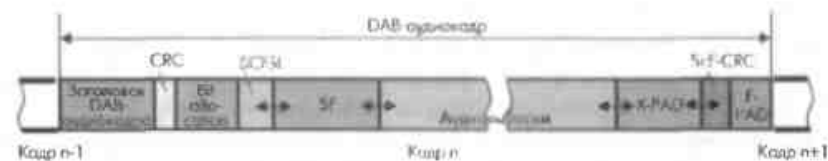


Рис. 5.2. Структура DAB-аудиокадра

В кадрах MPEG Audio Layer 2-го поля аудиовыборок следует зарезервированное поле служебной информации. В DAB-аудиокадрах, структурно аналогичных MPEG, эти поля заняты двумя байтами «фиксированных данных, связанных с программой» (Fixed Programme Associated Data, F-PAD) и контрольной суммой фактора масштабирования. Кроме того, по желанию пользователя может быть добавлено поле «дополнительных связанных с программой данных» (Extended PAD, E-PAD). Размер этого поля произволен — чем больше E-PAD, тем меньше поле аудиоданных.

Транспортный механизм стандарта ETS 300 401 предусматривает три основных информационных потока, формирующих кадр передачи (рис. 5.3):

- 1) основной сервисный канал Main Service Channel (MSC), служащий для передачи аудиоинформации и данных;
- 2) быстрый информационный канал Fast Information Channel (FIC), несущий служебную и вспомогательную информацию;
- 3) канал синхронизации, используемый при демодуляции (кадровая синхронизация, контроль частоты, оценка состояния канала, идентификация передатчика).



Рис. 5.3. Структура кадра передачи

Быстрый информационный канал FIC состоит из так называемых быстрых информационных блоков (Fast Information Block, FIB). Каждый FIB включает 240 бит полезной информации и 16-битную контрольную сумму CRC, всего 256 бит. Поле полезной информации, в свою очередь, может быть разбито на сегменты (Fast Information Groups, FIGs) произвольной длины. Основное назначение FIC — передача многочисленной служебной информации, а также поддержка различных информационных сервисов (указание времени, радиотекст, меню программ, шейджинг и т.п.). По этому же каналу передается информация о мультиплексировании различных программ и сервисов в кадре передачи.

Основной сервисный канал MSC состоит из Common Interleaved Frames (CIF) — общих вложенных кадров, по 55 296 бит каждый. Минимальный адресуемый элемент CIF — Capacity Unit (CU) 64 бит. Всего в CIF 864 CU. CIF подразделяется на субканалы. Каждый из них включает целое число последовательных CU. Субканалу соответствует определенная радиопрограмма (сервис). Очевидно, что допустимое число программ и дополнительных сервисов (субканалов) в кадре передачи зависит от скорости кодирования аудиосигнала. Практика показала, что в одной полосе возможно транслировать до шести программ с качеством аудиосигнала на уровне CD.

По основному сервисному каналу передаются не только аудиоданные, но и информация общего назначения. Стандартом предусмотрено два режима передачи данных — потоковый и пакетный. Скорость данных в первом режиме кратна 8 кбит/с, во втором — зависит от размера и частоты следования пакетов. Пакетный режим позволяет в одном субканале передавать несколько различных сервисов, поскольку размер пакета невелик — от 24 до 96 байт.

Стандарт Eureka-147 задумывался как максимально универсальный — для наземного, кабельного и спутникового вещания, для одночастотных глобальных сетей и локальных зон. Поэтому в нем предусмотрено четыре режима передачи, каждый из которых оптимален для определенного применения. Назначение этих режимов рассмотрим ниже, сейчас лишь отметим, что структура и длительность кадра передачи в каждом из них различны (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Структура кадра в зависимости от режима передачи

Режим передачи	Длительность кадра, мс	Число FIB в кадре	Число CIF в кадре
I	96	12	4
II	24	3	1
III	24	4	1
IV	48	6	2

В MSC все данные кодируются, причем независимо для каждого подканала. Прежде всего, информация может быть защищена от несанкционированного доступа. Для этого используется перемножение информации на некоторую псевдослучайную последовательность (ПСП), ключом является 8-байтное контрольное слово, единожды заданное или периодически изменяемое и передаваемое в приемники. Система контроля доступа может и не использоваться. Однако это — инструмент авторизации программ, взимания абонентской платы за их прослушивание, а при желании — за каждый сервис в отдельности.

Далее все данные кодируются в целях энергетического сглаживания сигнала, чтобы его спектр был как можно более ровным, шумоподобным. Для этого используется умножение на ПСП, которую формирует генератор с заданным полиномом вида $P(x) = x^9 + x^5 + 1$ (рис. 5.4). Инициализирующее слово — 1FF₁₆.

После выравнивающего кодирования начинается сверточное избыточное кодирование, при котором объем информации существенно (на 25–300%) возрастает, а вместе с ним — и степень защиты от ошибок передачи. Схема сверточного кодера приведена на рис. 5.5.

Каждому входному биту соответствуют четыре выходных. Однако используют не обязательно все четыре, поэтому скорость кодирования может варьироваться от $8/9$ до $8/32$ (число входных/выходных бит). Существенно, что различные информационные поля кодируются с разной скоростью. Кроме того, скорости кодирования аудиоинформации в MSC и данных в FIC различны. В итоге наиболее защищенной оказывается служебная управляющая информация, наименее — поля аудиовыборок, что естественно: потери управляющей информации могут носить фатальный характер. Скорость кодирования в FIC — $1/3$, т. е. вместо исходных 256 бит FIB образуются $3 \times 256 = 768$ бит.

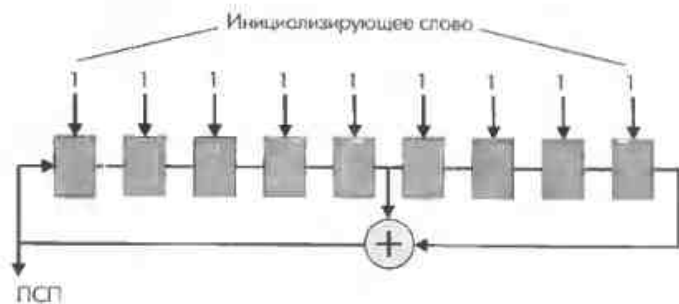


Рис. 5.4. Генератор ПСП для рандомизации спектра сигнала

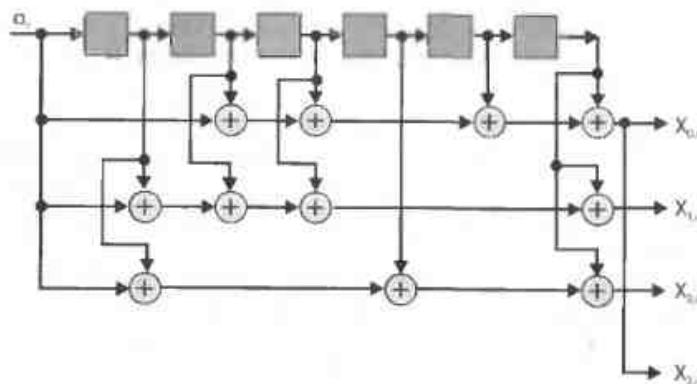


Рис. 5.5. Сверточный кодер

После сверточного кодирования данные в MSC — и только в нем — подвергаются временному перемеживанию (перемешиванию). В этом канале вся информация структурирована в виде логических

кадров — пакетов информации, связанных с исходными блоками данных длительностью 24 мс (DAB-аудиокадры либо блоки данных). Число бит в логическом кадре зависит от стадии и скорости кодирования. Информация из каждых 16 логических кадров перемешивается по определенному закону и распределяется по 16 последовательным пакетам данных. Благодаря этому, если из-за длительной помехи какой-либо пакет пропадет, исчезнет лишь часть информации каждого из 16 логических кадров, которую можно будет восстановить при декодировании.

В MSC все процедуры кодирования выполняются независимо для каждого аудиопотока или информационного сервиса. И только после временного перемеживания пакеты мультиплексируются в CIF. Каждому потоку в CIF выделяется субканал, занимающий целое число 64-битных CU. Информация о схеме мультиплексирования (начальный адрес и размер субканала, скорость кодирования) передается в FIC. После формирования CIF в соответствии с выбранным режимом передачи (см. табл. 5.1) мультиплексор формирует кадр передачи (рис. 5.6).

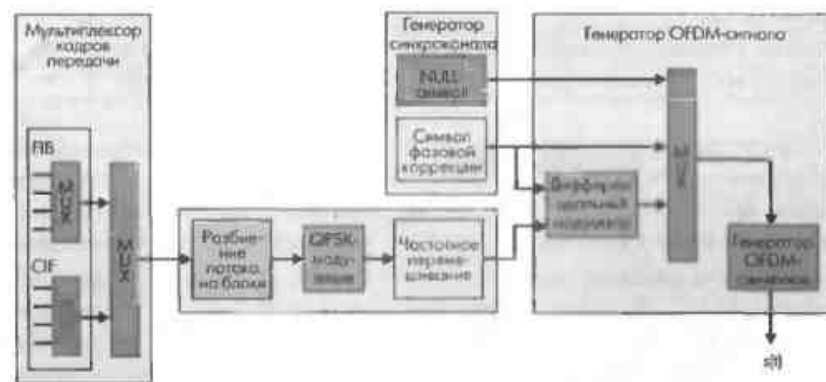


Рис. 5.6. Функциональная схема формирования радиосигнала

Информация кадра передачи транслируется в виде последовательности OFDM-символов. Первые два OFDM-символа кадра принадлежат каналу синхронизации. Это так называемый NULL-символ (уровень сигнала равен 0) и символ, несущий информацию о фазе дифференциальной QPSK-модуляции в следующем OFDM-символе. Информация из FIB и CIF группируется в виде битной последовательности и разбивается на OFDM-символы. Каждому символу соответствует число бит, вдвое большее, чем число несущих в выбранном

режиме передачи (табл. 5.2). Например, для первого режима передачи одному OFDM-символу соответствуют $2 \times 1536 = 3072$ бит. Поскольку размер кодированного FIB — 768 бит, в этом режиме передачи одному OFDM-символу соответствует 4 кодированных FIB, или 3 OFDM-символа на все 12 пакетов быстрого информационного канала. В основном сервисном канале размер пакета FIC — 55 296 бит, или 18 OFDM-символов на пакет в первом режиме передачи (всего 72 пакета на 4 CIF-кадра передачи).

Таблица 5.2. Параметры режимов передачи Eureka-147

Режим передачи	I	II	III	IV
Длительность кадра, мс	96	24	24	48
Длительность Null-символа, мкс	1297	324	168	648
Длительность защитного интервала, мкс	246	62	31	123
Номинальное максимальное расстояние между передатчиками, км	96	24	12	48
Номинальный частотный диапазон, МГц	до 375	до 1500	до 3000	до 1500
Длительность информационной части символа, мкс	1000	250	125	500
Общая длительность символа, мкс	1246	312	156	623
Число ортогональных несущих	1536	384	192	768

Далее последовательность OFDM-символов кадра, за исключением первых двух из синхроканала, подвергается квадратурной модуляции QPSK. Каждым двум битам двоичного OFDM-символа ставится в соответствие QPSK-символ, который в комплексном виде может быть записан как $q_{l,n} = \frac{\sqrt{2}}{2}[(1 - 2p_{l,n}) + i \times (1 - 2p_{l,n+k})]$, где $n = 0, 1, \dots, K - 1$ — номер несущей; $l = 2, \dots, L - 1$ — текущий номер OFDM-символа (всего L символов в кадре); $p_{l,n}$ — n -й бит l -го OFDM-символа; K — число ортогональных несущих в заданном режиме передачи. Иными словами, два бита раскладываются на квадратурные составляющие одной несущей.

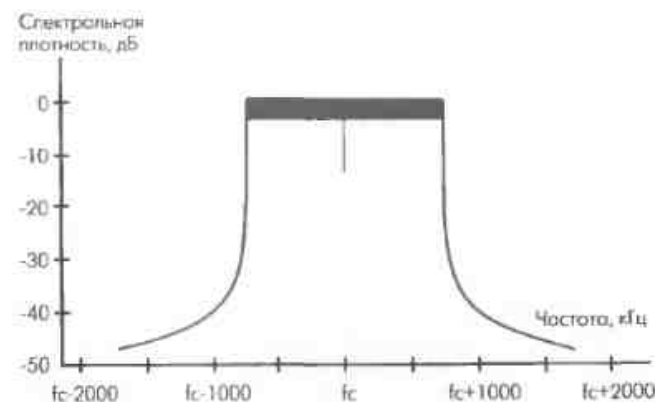
Далее происходит частотное перемешивание: последовательные QPSK-символы распределяются по K несущим по определенному закону. В результате помеха в полосе нескольких соседних несущих повредит лишь малую часть информации из разных информационных блоков. Итоговая последовательность QPSK-символов попадает в дифференциальный QPSK-модулятор со сдвигом фазы на $\pi/4$, поэтому и необходим второй символ синхроканала с информацией о фазе. К модулированной последовательности добавляются два

символа из синхроканала, и последовательность поступает в генератор OFDM-сигнала, в котором формируется аналоговый сигнал. Отметим, что передаваемые OFDM-символы разделены защитным временным интервалом, что избавляет от помех, связанных с многолучевым распространением (перезотражениями), неизбежным в городских условиях, — переотраженный сигнал попадает в защитный интервал и не интерferирует со следующим OFDM-символом.

К основному DAB-сигналу может быть добавлен так называемый сигнал-идентификатор передатчика, размещаемый в NULL-символах некоторых кадров передачи. Его основное назначение — передавать информацию о географическом положении передатчика.

Спектр DAB-сигнала в любом режиме передачи занимает полосу порядка 1,5 МГц (рис. 5.7). Параметры режимов передачи выбраны так, что первый режим оптимален для одночастотных наземных сетей вещания в УКВ-диапазоне, режимы II и IV ориентированы для наземной трансляции в УКВ-, а также в L-диапазоне (1452–1492 МГц) в локальных и одночастотных глобальных сетях. Режим III лучше всего подходит для кабельного и спутникового вещания, а также для гибридных спутниково-наземных сетей.

Рис. 5.7. Теоретический спектр DAB-радиосигнала в первом режиме передачи



Мы столь подробно остановились на Eureka-147, поскольку это европейский, следовательно, наиболее близкий для России стандарт. Кроме того, это единственный на сегодня стандарт цифрового радиовещания, действительно обеспечивающий CD-качество программ. На этом можно было бы поставить точку, если бы не важнейший вопрос: в каком диапазоне организовывать вещание? Ведь стандарт

рассчитан на диапазоны в пределах от 30 МГц до 3 ГГц. И в России, и в США в этой части радиоспектра свободных полос нет — они заняты действующими в полосе 87,5–108 МГц FM-радиостанциями или зарезервированы под военные и им подобные нужды. Быстрого отказа от FM-вещания не предвидится, поскольку цены DAB-приемников — несколько сот долларов, а в США — сотни коммерческих FM-радиостанций. Поэтому Федеральная комиссия связи США FCC не дала «добро» на внедрение Eureka-147. Там пошли своим путем, развивая систему iDAB на базе технологии ИВОС (In Band On Channel).

5.2. Технология ИВОС

Основная идея ИВОС — сделать переход от аналогового вещания к цифровому плавным, без выделения дополнительных каналов. Рассматриваются два диапазона: занятые сегодня под вещание с амплитудной модуляцией (АМ) длинные, средние и короткие волны и УКВ-диапазон с частотной модуляцией (FM) 87,5–108 МГц. В каждом из них предусмотрено два режима вещания: гибридный и полностью цифровой. В первом случае происходит одновременное аналоговое и цифровое вещание, во втором — только цифровое.

В FM-режиме основная полоса каналов занимает около 240 кГц, а две боковые — еще по 120 кГц. По правилам FCC уровень сигнала в боковых полосах должен быть на 25 дБ ниже, чем в основной (рис. 5.8). В гибридном режиме сигналы цифрового вещания передают в боковых полосах, в цифровом — в основной и боковых. Теоретически возможная скорость цифрового потока в боковых полосах 64 кбит/с, в основной полосе — 96–128 кбит/с.

В АМ-вещании модулируется несущая с частотой 9/10 кГц. Реальная ширина спектральной полосы основного сигнала — порядка 20 кГц, еще по 10 кГц занимают боковые полосы (рис. 5.9). В гибридном режиме полоса цифрового потока перекрывает полосу аналогового вещания, но с меньшим уровнем сигнала. В цифровом режиме сигнал занимает всю полосу в соответствии с разрешенным шаблоном. Скорость передачи в гибридном режиме от 20 до 48 кбит/с, в полностью цифровом — до 64 кбит/с.

Чтобы в столь узких полосах, особенно в АМ-диапазонах, достичь осязаемого качества вещания, необходим совершенный аудиокодек. Система ИВОС основывалась на технологии кодирования РАС (Perceptual Audio Coding) компании Lucent Technologies. Одно из

его важнейших свойств в том, что информация разбивается на отдельные потоки: основной и дополнительные. Если ширина канала не позволяет передавать всю информацию, транслируется только основной поток с некоторой потерей качества аудиосигнала. Если появляется возможность передавать дополнительные потоки, качество повышается. При РАС-кодировании при скоростях потока 128–96 кбит/с качество декодированного сигнала мало отличается от оригинала — стереосигнала с CD-диска (16 бит, частота выборки 44,1 кГц). Но такие скорости возможны лишь при полностью цифровом FM-режиме. В АМ-режимах при скорости потока 48 кбит/с качество цифрового вещания примерно соответствует хорошему прислу аналогового FM-стерео.

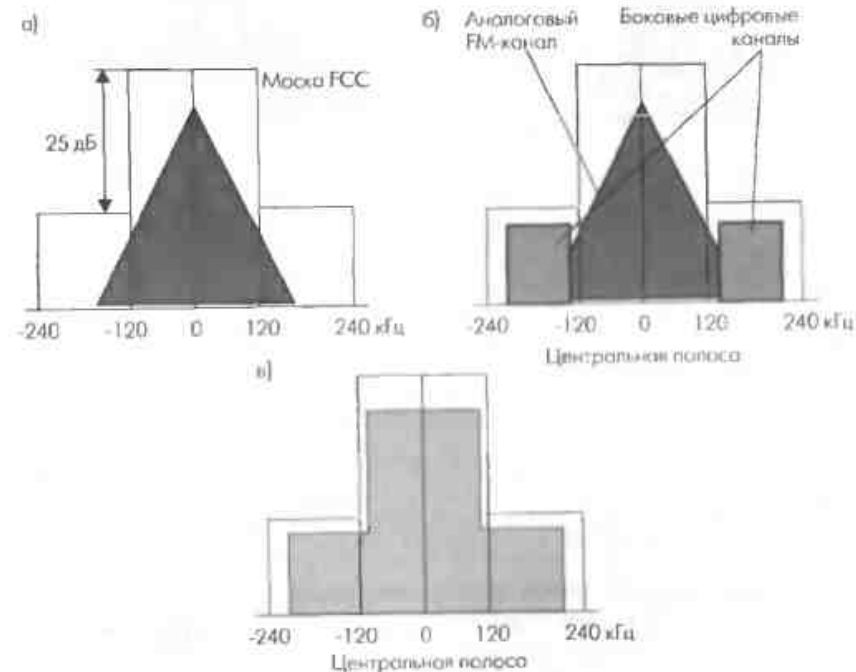


Рис. 5.8. Спектр сигналов ИВОС в диапазоне FM-вещания: а — аналоговый; б — гибридный; в — цифровой режимы

Развитие технологии цифрового вещания в США сегодня сосредоточено в образованной в августе 2000 г. корпорации iBiquity Digital. Эта компания родилась в результате совместной двухлетней работы корпораций USADR (USA Digital Radio) и Lucent Digital Radio.

USDAR возникла в 1991 г. как альянс компаний CBS, Gannett и Westinghouse Electric. С 1998 г. она преобразована в независимую компанию. Имению ей принадлежат ключевые патенты на технологию IBOC. Lucent Digital Radio появилась также в 1998 г. как подразделение Lucent Technologies в союзе с фирмой Pequot Capital Management. Компания развивала собственную версию DAB на основе технологии аудиокодирования AAC.

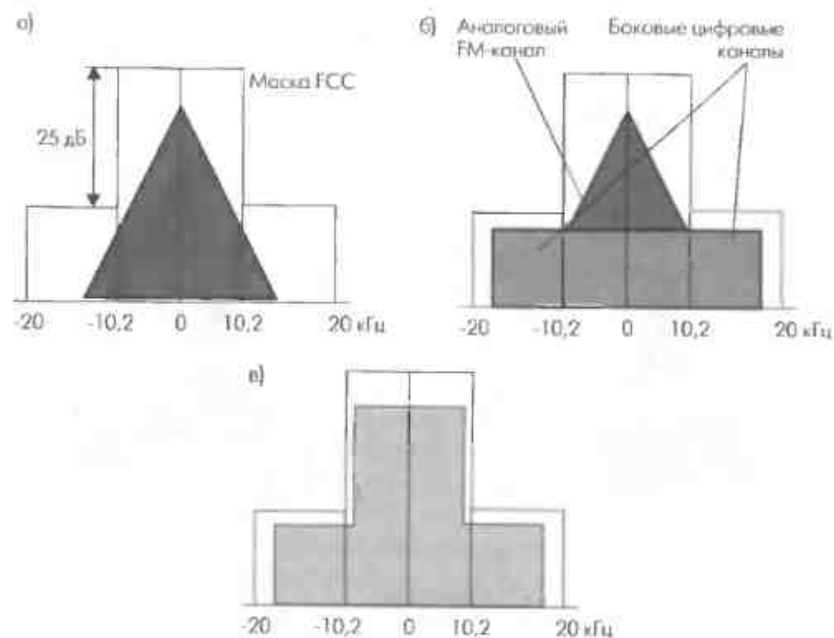


Рис. 5.9. Спектр сигналов IBOC в диапазоне AM-вещания: а — аналоговый; б — гибридный; в — цифровой режимы

Существенная особенность технологии цифрового вещания в США — возможность передавать одну и ту же программу в цифровом и аналоговом виде с некоторым временным сдвигом. Когда цифровой сигнал пропадает, приемник незаметно для слушателя переходит на воспроизведение аналогового сигнала. Это позволяет успешно бороться с так называемым клифф-эффектом, проявляющимся в цифровых вещательных системах в виде периодов неразборчивости сигнала. По мнению специалистов компании iViquity, переход на полностью цифровое вещание целесообразен, пока число IBOC-приемников не составит по меньшей мере 85%.

Система вещания IBOC строится на технологии модуляции с использованием ортогональных несущих COFDM. Структура передатчика приведена на рис. 5.10. Аудиосигнал параллельно транслируется в цифровом и аналоговом виде. В цифровом тракте происходит аудиокодирование, защитное кодирование и перемежение, после чего цифровая последовательность поступает на OFDM-модулятор. Аналоговый сигнал с задержкой поступает в стандартный аналоговый тракт и после обработки смешивается с цифровым сигналом OFDM-модулятора. Суммарный сигнал после фазово-амплитудной модуляции попадает в стандартный передающий модуль.



Рис. 5.10. IBOC-передатчик

Основное достоинство американской системы по сравнению с европейской — это более дешевое оборудование, прежде всего приемники. Еще несколько лет назад стоимость DAB-ресивера для Eureka-147 составляла около 1000 долларов, и то время как для IBOC-приемников назывались цифры порядка 100 долларов. Но ситуация стремительно меняется, и хотя цены на приемники Eureka-147 все еще достаточно высоки, однако они уже достигли уровня 300–400 долларов., и тенденция к их снижению продолжится.

Кроме наземных систем вещания, важную роль в США отводят спутниковому цифровому радиовещанию. Здесь реально конкурируют две системы: компаний Sirius Satellite Radio и XM Satellite Radio. С технической точки зрения эти спутниковые системы во многом уникальны. Поскольку они предназначены в основном для работы с автомобильным радио и ориентированы на массовый потребитель-

ский рынок, их приемники должны быть дешевле, чем любой ранее выпущенный ресивер спутниковых сигналов. Приемные антенны — обязательно ненаправленные, с широким усилением, поскольку дорогостоящие системы слежения антенны за спутником неприемлемы.

В системе XM оба спутника находятся на обычной геостационарной орбите в точках стояния 85° и 115° западной долготы. Под именами Rock и Roll они были выведены на орбиту соответственно в марте и мае 2001 г. По заявлению представителей компании это «наиболее мощные спутники в индустрии развлечений», что помогает компенсировать относительно малый коэффициент усиления приемной антенны на автомобиле.

Оба спутника транслируют идентичные сигналы в разных частотных диапазонах. Их пространственное положение таково, что при идеальных условиях приемник будет «видеть» и принимать сигналы от обоих спутников. Поэтому затенение одного из них не приведет к пропаданию сигнала. Кроме того, сигналы транслируются не синхронно, а с некоторой временной задержкой (до 4–5 с), поэтому, если оба спутника на короткое время исчезнут из поля зрения приемника, передача все равно не прервется.

В системе компании Sirius Satellite Radio задействовано три спутника на сильно вытянутых эллиптических орбитах. Период обращения спутников — примерно 16 часов, поэтому в зоне видимости с территории США всегда находятся два из них. В среднем угол возвышения спутников составляет 60° , что больше угла возвышения (45°) спутников на геостационарной орбите системы XM. В результате в системе Sirius вероятность экранирования спутника наземным препятствием ниже, а само по себе постоянное перемещение спутников не проблема, поскольку приемные антенны практически всенаправлены.

Поскольку для передачи отведены лишь два частотных канала, только два из трех спутников могут одновременно передавать сигналы, иначе два спутника работали бы в одном частотном диапазоне и создавали взаимные помехи. Поэтому у опускающегося за горизонт спутника ретранслятор выключается, у поднимающегося — включается. При этом возможен кратковременный (порядка миллисекунд) перерыв приема от двух спутников, однако третий — наиболее высокий спутник — продолжает вещание, поэтому подобный перерыв практически незаметен.

Как в системе XM, так и в системе Sirius предусмотрена сеть наземных ретрансляторов для обслуживания таких недоступных для спутников участков, как туннели или «городские каньоны». В отли-

чие от применяемой при вещании со спутников четырехпозиционной квадратурной модуляции QPSK с временным разделением каналов (TDM), наземные ретрансляторы используют COFDM/TDM-модуляцию. В системе XM со спутниками на геостационарной орбите ретрансляторы (всего 1500) принимают сигналы с помощью неподвижных направленных антенн с высоким коэффициентом усиления. Это необходимо, поскольку переносимый ретранслятором сигнал очень близок по частоте к принимаемому со спутника, но гораздо более мощный. Поэтому он не должен попадать на приемную антенну. В системе Sirius для узконаправленной антенны понадобилась бы система слежения. Вместо этого выбран более дешевый метод передачи сигналов на 105 наземных ретрансляторов от геостационарных связных спутников, которые работают в другом частотном диапазоне (Ku, 12–14 ГГц).

Вещание на приемники ведется в диапазоне около 2,3 ГГц, общая скорость информационного потока (до кодирования) — 4 Мбит/с в XM и 4,4 Мбит/с — в Sirius, что соответствует примерно 50 музыкальным программам (по 64 кбит/с) и 50 новостным. Аудиосигнал кодируется AAC-алгоритмом, для защиты от ошибок используется кодер Рида-Соломона и сверточное кодирование со скоростью 1/2.

Многие известные компании, например Pioneer, Alpine, Sony, Clarion, Delphi-Delco Electronics System, производят приемники для спутниковой системы XM. Причем цена такого приемника на 150 долл. выше обычного AM-FM. Для системы Sirius приемники производят такие компании, как Kenwood, Clarion, Alpine, Jensen, Panasonic и Visteon. Компания Sirius Satellite Radio имеет соглашения на установку трехдиапазонных (AM/FM/SAT) приемников в автомобили Ford, Chrysler, BMW, Mercedes, Mazda, Jaguar и Volvo, а также в тяжелые грузовые автомобили Freightliner и Sterling.

5.3. Всемирное цифровое радио (DRM)

DRM (Digital Radio Mondiale, всемирное цифровое радио) — это действительно международный консорциум, объединяющий свыше 70 известных исследовательских, производственных и вещательных компаний и организаций всего мира. Его цель — создание стандарта цифрового радиовещания в полосе ниже 30 МГц. При этом преследуются такие цели, как значительное улучшение качества звука, снижение помех и сохранение зоны обслуживания при значительном — до браз — уменьшении мощности передатчика. Поскольку ширина полосы цифрового вещательного сигнала в DRM эквивалентна поло-

се аналогового, для перехода на цифровое вещание дополнительного спектрального диапазона не требуется. Образованный в 1996 г., этот консорциум уже стал реальным широко в мире цифрового вещания — многие ведущие производители уже демонстрируют опытные образцы DRM-оборудования. Спецификация DRM признана как ITU (Рекомендация ITU-R BS.1514), так и Европейским институтом стандартов ETSI.

Система DRM также использует OFDM-модуляцию (порядка 200 несущих) с предварительной 16- и 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляцией (16- и 64-QAM), защитное сверточное кодирование и временное перемежение информации. Для аудиокодирования приняты алгоритмы AAC (Advanced Audio Coding) — низкоскоростной алгоритм, применяемый в группе стандартов MPEG-4 (изначально создавался для аудиокодирования в MPEG-2). Кроме того, для кодирования речи предусмотрен низкоскоростной алгоритм CELP. Механизм AAC дополнен алгоритмом Spectral Band Replication (SBR) компании Coding Technologies (Германия), позволяющим существенно улучшить качество принимаемого аудиосигнала без существенного увеличения скорости потока. Ограничение скорости цифрового потока при кодировании приводит к сужению спектра аудиосигнала — пропадают верхние частоты. Алгоритм SBR позволяет восстанавливать высокочастотную составляющую сигнала по переданной низкочастотной, крайне незначительно увеличивая необходимую скорость потока аудиоданных. Так, если после сжатия кодером AAC верхняя частота передаваемого аудиосигнала 6 кГц, то SBR поднимает ее до 15 кГц.

В DRM предусмотрено три информационных канала (рис. 5.11): Main Service Channel (MSC), Fast Access Channel (FAC) и Service Description Channel (SDC). По MSC передаются оцифрованные аудиосигналы и информационные данные (всего до четырех различных потоков), через FAC — оперативная служебная информация, SDC используется для передачи относительно редко обновляемой служебной информации. Передача через MSC и FAC происходит кадрами длительностью 0,4 с, через SDC — кадрами по 1,2 с [51].

Таким образом, сегодня существует несколько систем цифрового радио, которые можно рассматривать как стандарты, что и подтверждает в своих недавних рекомендациях ITU. Причем если Eureka-147 ориентирована на широкополосные односторонние трансляционные сети и в ряде случаев требует пересмотра сложившегося распределения частот, то системы DRM и IVOC изначально предназначены для работы в уже существующих диапазонах. Недаром наряду с

развитием систем Eureka-147 многие европейские производители и радиовещатели (например, BBC) уделяют серьезное внимание DRM. Действительно, традиционное AM-вещание в диапазоне средних и коротких волн унывает, поскольку широко не устраивает по качеству. Цифровое же вещание позволит использовать достоинства распространения волн в этих диапазонах с качеством, конечно, не CD, но уж по крайней мере традиционного FM-вещания. Сколько при этом будут стоить приемники — вопрос.

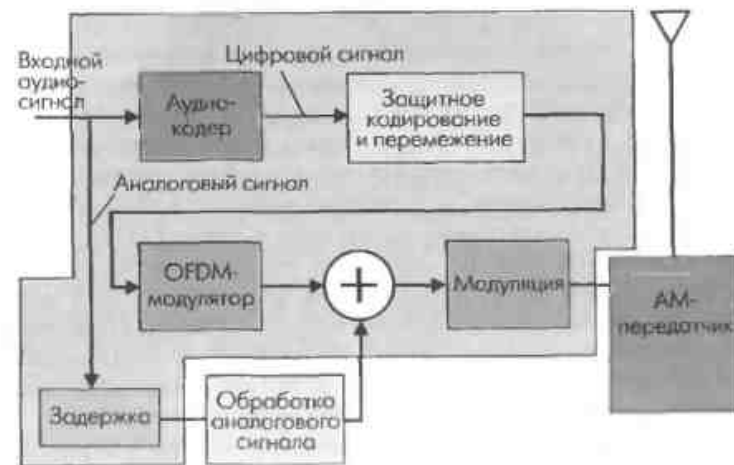


Рис. 5.11. Передающая система DRM

WACR-92 отвела полосу частот 1452–1492 МГц для спутникового цифрового радиовещания (кроме США, России, Белоруссии и Украины). В этой же полосе возможно создание и наземных сетей. Но до 2007 г. эти частоты не могут быть использованы на первичной основе. Система же Eureka-147 сегодня развивается весьма активно и не только в Европе, но и в Австралии, Канаде и Израиле. Аудитория DAB-слушателей по всему миру составляет свыше 284 млн человек. Поскольку цифровое радиовещание ориентировано прежде всего на автотранспорт, системы ретрансляции строят вдоль крупнейших автодорог. Сегодня под непрерывный аккомпанемент DAB-станций можно проехать от Женевы до Мюнхена (468 км), в Норвегии — из Порсгунда в Тронхейм (800 км), из Лондона в Ньюкасл (459 км) и т. д.

Кроме собственно передачи звуковых программ DAB Eureka-147 может обеспечить и различные информационные сервисы, в том числе низкоскоростное мобильное видео (MPEG-2), трансляцию различ-

ных картинок (вспомним, что явилось толчком и экономическим фундаментом развития Интернета), различную текстовую новостную и справочную информацию. Все это делает цифровое вещание мощным конкурентом третьего поколения (3G) сотовой связи в области информационных услуг и мобильного видео. Хотя DAB не интерактивна, но разнообразие сервисов DAB в известной мере компенсирует этот недостаток. Причем лицензии на DAB-вещание, например, в Великобритании (порядка 50 тыс. фунтов) несоизмеримо дешевле миллиардных 3G-лицензий сотовой связи.

Наступление эры цифрового радио неизбежно и в нашей стране. «Концепция внедрения наземного цифрового звукового вещания в России в части использования радиочастотного спектра» существует с 1998 г. В феврале 2002 г. Министерство РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций передало в правительство проект постановления «О мерах по обеспечению внедрения цифрового телевизионного и звукового вещания в Российской Федерации». Он предусматривал разработку в 2002–2003 г. программ внедрения телевизионного и звукового вещания, частотного плана для этого вещания по всей территории РФ, положения о конкурсе на право использования радиочастотного спектра для наземного телерадиовещания, а также ряда государственных стандартов и создание соответствующей аппаратуры. Пока все осталось на бумаге.

Видимо, в России, ориентирующейся на систему Eureka-147, одна из наиболее сложных проблем — поиск частотного ресурса. В качестве наиболее вероятного указывают на так называемый III вещательный диапазон 174–230 МГц. Однако все может упереться в основную проблему: где взять финансирование на разработку нормативных документов, разработку оборудования и развертывание сетей.

ГЛАВА 6

СТАНДАРТ DECT

6.1. Назначение стандарта DECT

DECT — стандарт уникальный. Задуманный для телефонии, он практически сразу стал использоваться в системах передачи данных. Изначально предназначенный для Европы, распространился по всему миру. DECT конкурирует со стандартами сотовой связи, радиорелейными технологиями, проникает в домашние мультимедийные системы, становится средством первичного доступа в общественные телефонные сети, входит в пул стандартов сотовой телефонии третьего поколения IMT-2000. Рынок систем DECT до сих пор остается одним из наиболее динамичных в мире.

Исторически DECT был призван избавить пользователей телефонных аппаратов от соединительных шнуров. С развитием интегральных полупроводниковых технологий телефоны стали оснащать приемопередающими блоками: появились первые радиоудлинители — обычные аналоговые телефоны, в которых шнур заменен радиотрактом. Это поколение телефонов называют СТ-0 (Cordless Telephone). Такие устройства существуют и поныне. Их основное назначение — позволить владельцу свободно перемещаться в радиусе десятков сотен метров от точки подключения к телефонной сети. Главные недостатки данных устройств — относительно высокая мощность излучения (до 1 Вт), взаимные помехи, абсолютная открытость для подслушивания и несанкционированного подключения к радиотракту. В 80-х годах в Европе появились системы стандарта СТ-1 — те же аналоговые радиоудлинители, но с зачатками функций современных беспроводных средств связи, такими, как роуминг и перемещение между сотами без разрыва соединения.

Однако подлинным прорывом стало появление цифровой спецификации СТ-2 (табл. 6.1). Разработана эта спецификация в Великобритании в 1989 г. (общий беспроводной стык Common Air Interface, CAI/СТ-2, стандарт МРТ 1375). В 1992 г. ETSI принял CAI/СТ-2 в качестве европейского стандарта. На основе СТ-2 была создана

система Telepoint, получившая достаточно широкое распространение во всем мире. В ней фактически впервые была реализована микросотовая архитектура (рис. 6.1). Системам CT-2 предрекали большое будущее, однако после резкого снижения цен на услуги сотовой связи во второй половине 90-х годов прошлого века интерес к ним упал [9]. В начале 90-х появились системы на основе стандарта CT-3 фирмы Ericsson. Они были установлены в ряде стран, однако вскоре внимание европейского телекоммуникационного сообщества переключилось на новую спецификацию, названную Digital European Cordless Telecommunications – DECT.

Таблица 6.1. Основные характеристики систем связи стандартов CT-2 (Tangara RD), CT-3 и DECT

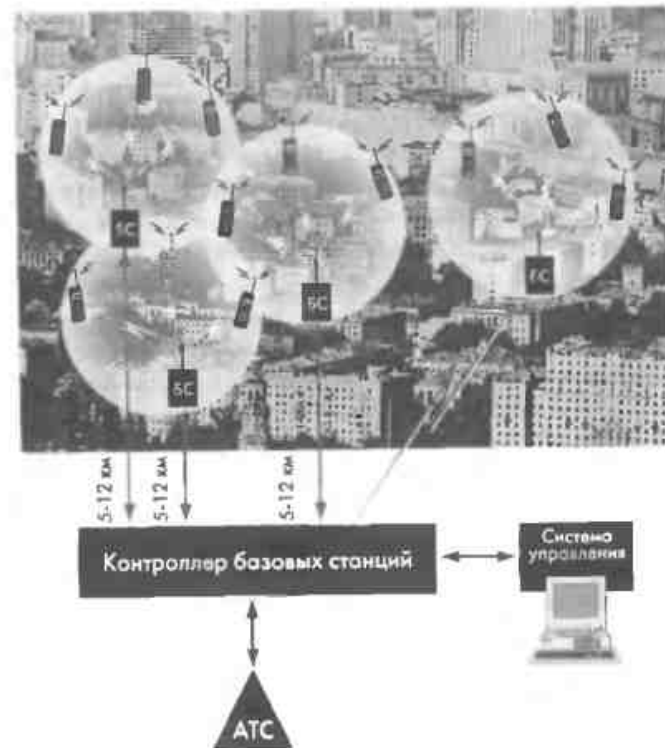
Параметр	CT-2 Tangara RD	CT-3	DECT
Диапазон рабочих частот, МГц	864–868,2	862–866	1880–1900
Способ разделения каналов	FDMA	TDMA с много-частотным разделением (4 канала), 8 дуплексных каналов на несущую	TDMA с много-частотным разделением (10 каналов), 12 дуплексных каналов на несущую
Ширина полосы канала, МГц	0,1	1	1,728
Организация дуплексной связи	TDD	TDD	TDD
Кодирование речи	ADPCM, 32 кбит/с	—	ADPCM, 32 кбит/с
Число каналов, поддерживаемых базовой станцией	2–6	32	до 120
Мощность передатчиков, мВт	10	—	10–250

В 1988 г. новый стандарт был одобрен Конференцией европейских администраций почты и электросвязи (CEPT). Под него был выделен диапазон 1880–1900 МГц. В 1992 г. ETSI публикует первые спецификации DECT – ETS 300 175 и 176 (DECT Common Interface (CI) и DECT Approval Test Specification соответственно). В этих документах были заложены базовые основы DECT.

Фактически DECT – это набор спецификаций, определяющих радиопериферейсы для различных видов сетей связи и оборудования. DECT CI содержит требования, протоколы и сообщения, обеспечивающие взаимодействие сетей связи и оконечного оборудования.

Организация самих сетей и устройство оборудования в стандарт не входят.

Рис. 6.1. Микросотовая сеть связи



Важнейшая задача DECT – обеспечить совместимость оборудования различных изготовителей. Для этого был разработан ряд профилей взаимодействия различных систем. В 1994 г. появился первый из них, унифицированный профиль доступа GAP (Generic Access Profile) – ETS 300 444. Он определяет работу оконечных устройств DECT (телефоны, базовые станции, беспроводные офисные АТС) для всех приложений голосовой связи с полосой пропускания речевого тракта 3,1 кГц. Позднее появились профили взаимодействия DECT и GSM, DECT и ISDN, взаимодействия абонентов с ограниченной мобильностью с сетями общего пользования (Cordless Terminal Mobility, CTM), со средствами абонентского радиодоступа (Radio Local Loop, RLL) и т. д.

Первые коммерческие продукты в стандарте DECT были представлены на выставке CeBIT'93 в Ганновере. Это были бесшнуровой телефон Gigaset производства Siemens, радио-АТС Freeset (DCT-1800) фирмы Ericsson и радиосистема для передачи данных NET3 компании Olivetty. Судьба их сложилась по-разному — о продукте NET3 помнят разве что специалисты, в то время как семейство Gigaset активно производится и развивается до сих пор. На CeBIT'96 уже пять ведущих европейских производителей, Alcatel, Ericsson, Nokia, Philips и Siemens демонстрировали свои изделия для DECT. Тогда же DECT приказом Минсвязи был легализован в России.

Изначально DECT был ориентирован на телефонию — радиодлинители, беспроводные учрежденческие АТС, предоставление радиодоступа к телефонным сетям общего пользования. Но стандарт оказался столь удачным, что его стали использовать в системах передачи данных, беспроводного абонентского доступа к сетям связи общего пользования. DECT нашел применение в приложениях мультимедиа и домашних радиосетях, для доступа в Интернет и к факсимильной связи.

Бурно прогрессирует и технология беспроводного доступа посредством радиоретрансляционных DECT-систем. Уже к началу 1997 г. число таких линий превысило 1 млн. По данным компании Strategy Analytics, в 1998 г. на европейском рынке было продано около 18 млн беспроводных телефонов DECT. На январь 1999 г. 53% всех продаваемых в Европе телефонов с радиодлинителем были стандарта DECT, причем в Германии этот показатель составил 80%.

Системы и устройства DECT распространены во всех странах мира. На мировом рынке представлены более 200 различных продуктов DECT [55]. Не случайно сейчас аббревиатура DECT расшифровывается как Digital Enhanced (вместо European) Cordless Telecommunication.

6.2. Принципы организации DECT

Что же представляет собой радиointерфейс DECT? В диапазоне шириной 20 МГц (1880–1900 МГц) выделено 10 несущих частот с интервалом 1,728 МГц. В DECT применяется технология доступа с временным разделением каналов — TDMA (Time Division Multiple Access). Временной спектр разделен на отдельные кадры по 10 мс (рис. 6.2). Каждый кадр разбит на 24 временных слота: 12 слотов для приема (с точки зрения носимого терминала) и 12 — для передачи. Таким образом, на каждой из 10 несущих частот форми-

руется 12 дуплексных каналов — всего 120. Дуплекс обеспечивается временным разделением (с интервалом 5 мс) приема/передачи (TDD — Time Division Duplex). Для синхронизации применяется 32-битная последовательность «101010...». В DECT предусмотрено сжатие речи в соответствии с технологией аддитивной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции АДИКМ (ADPCM) со скоростью 32 кбит/с (рекомендация ITU-T G.726). Поэтому информационная часть каждого слота — 320 бит. При передаче данных возможно объединение временных слотов. В радиотракте использована частотная модуляция с фильтром Гаусса (GFSK).

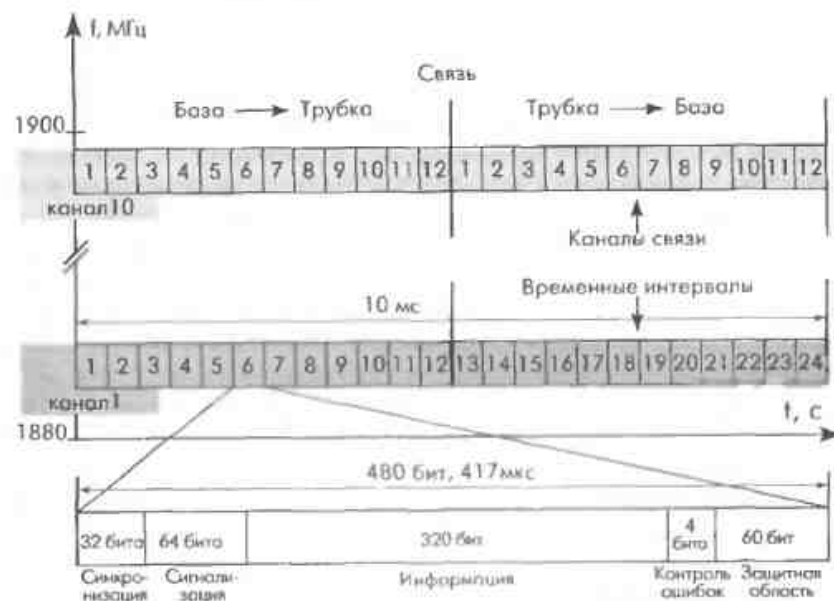


Рис. 6.2. Передача информации в системе DECT

Базовые станции (БС) и абонентские терминалы (АТ) DECT постоянно сканируют все доступные каналы (до 120). При этом измеряется мощность сигнала на каждом из каналов, которая заносится в список RSSI (Received Signal Strength Indication). Если канал занят или сильно зашумлен (например, помехами от другого DECT-устройства), показатель RSSI для него высокий. БС выбирает канал с самым низким значением RSSI для постоянной передачи служебной информации о вызовах абонентов, идентификаторе станции, возможностях системы и т. д. Эта информация играет роль опорных

сигналов для АТ — по ним абонентское устройство определяет, есть ли у него право доступа к той или иной БС, предоставляет ли она требуемые абоненту услуги, есть ли в системе свободная емкость, и выбирает базовую станцию с наиболее качественным сигналом.

В DECT канал связи всегда выбирает АТ. При запросе соединения от базовой станции (входящее соединение) АТ получает уведомление и выбирает радиоканал. Служебная информация передается БС и анализируется АТ постоянно, следовательно, АТ всегда синхронизируется с самой близкой из доступных БС. При установлении нового соединения АТ выбирает канал с самым низким значением RSSI — это гарантирует, что новое соединение происходит на самом «чистом» канале из доступных. Данная процедура динамического распределения каналов DCS (Dynamic Channel Selection) позволяет избавиться от частотного планирования — важнейшее свойство DECT.

Поскольку АТ постоянно (даже при установленном соединении) анализирует доступные каналы, может происходить их динамическое переключение во время сеанса связи. Такое переключение возможно как на другой канал той же БС, так и на другую БС. Эта процедура называется хэндовер (handover). При хэндовере АТ устанавливает новое соединение, и какое-то время связь поддерживается по обоим каналам. Затем выбирается лучший. Автоматическое переключение между каналами разных БС происходит практически незаметно для пользователя и полностью инициируется АТ. Это особенно важно для построения микросотовых систем, позволяющих абоненту переходить из соты в соту без прерывания соединения. Отметим, что, хотя выбор каналов всегда за АТ, в DECT предусмотрена возможность оповещения абонентского терминала со стороны БС о низком качестве связи, что может инициировать хэндовер.

Существенно, что в радиотракте аппаратуры DECT мощность сигнала весьма мала — от 10 до 250 мВт. Причем 10 мВт — практически номинальная мощность для микросотовых систем с радиусом соты 30–50 м внутри здания и до 300–400 м — на открытом пространстве. Передатчики мощностью до 250 мВт используют для радиопокрытия больших территорий (до 5 км при направленной антенне). Столь низкая мощность делает устройства DECT наиболее безопасными для здоровья. Недаром в европейских медицинских учреждениях разрешено применение систем радиотелефонии только этого стандарта.

Кроме того, при мощности 10 мВт возможно располагать базовые станции на расстоянии 25 м. В результате достигается рекордная плотность одновременных соединений — до 10 000 Эрл/км² (около

100 тыс. абонентов) при условии расположения БС по схеме шестиугольника в одной плоскости (на одном этаже). Это лучший показатель и с точки зрения эффективности использования радиоспектра (в пересчете на 1 МГц полосы). Сравните — 500 Эрл/МГц/км² для DECT против 100 Эрл/МГц/км² в наиболее емких сотовых сетях GSM-1800 (DCS 1800).

6.3. Защита от несанкционированного доступа

Основная проблема любых систем с радиодоступом — обеспечить защиту от несанкционированного подключения и прослушивания. Когда аппаратура DECT используется как средство доступа к телефонным сетям общего пользования, прежде всего возникает опасность появления «двойников» зарегистрированных АТ. В самом деле, защита обычных аналоговых телефонов с радиоудлишителем от несанкционированного подключения давно стала постоянной головной болью для их владельцев [3]. В системах DECT данная проблема решается посредством процедур аутентификации БС и АТ.

В простейшем случае каждый АТ регистрируется в системе или на отдельных БС, к которым имеет доступ. Если речь идет о домашнем беспроводном телефоне, АТ (трубка) зарегистрирован на одной БС. При каждом соединении происходит аутентификация трубки: БС посылает АТ «запрос» — случайное число (64 бит). АТ и БС на основании этого числа и ключа аутентификации по заданному алгоритму вычисляют аутентификационный ответ (32 бит), который АТ передает на БС. БС сравнивает вычисленный аутентификационный ответ с принятым и при их совпадении разрешает подключение АТ. В DECT существует стандартный аутентификационный алгоритм DSAA (DECT Standard Authentication Algorithm). Он поставляется производителям только по контракту с ETSI, однако даже его знание делает несанкционированное подключение весьма проблематичным.

Как правило, ключ аутентификации вычисляется на основании абонентского аутентификационного ключа UAK (User Authentication Key) длиной 128 бит либо аутентификационного кода AC (16–32 бит). UAK хранится в ПЗУ АТ либо в карточке DAM (DECT Authentication Module) — аналоге SIM-карты в стандарте GSM. AC можно записать в ПЗУ АТ и вручную либо вводить его при аутентификации. Совместно с UAK применяют и персональный идентификатор пользователя UPI (User Personal Identity) длиной 16–32 бит, вводимый только вручную. Существует ряд других процедур и механиз-

мов аутентификации и шифрования информации в сетях DECT [16]. Кроме того, заметим, что несанкционированный съём информации в системах с TDMA доступен только специалистам.

6.4. Системы DECT

Пожалуй, самое важное в DECT то, что он — динамично развивающийся стандарт. Сочетание различных профилей и протоколов DECT позволяет создавать системы совершенно разного назначения и стоимости — от бытовых беспроводных телефонов и мини-АТС до защищенных систем передачи данных и предоставления абонентского доступа к общественным телефонным сетям. Гибкая совместимость с такими стандартами, как ISDN и GSM, делает DECT мощным средством расширения абонентской емкости существующих сетей. Особенно ярко это проявляется по отношению к сетям сотовой связи стандарта GSM. Поскольку на физическом уровне протоколы DECT и GSM достаточно близки (частотный диапазон, технология TDMA), ряд фирм выпускают сотовые GSM-телефоны с поддержкой режима DECT. Когда такой телефон находится в зоне действия БС DECT, он работает в режиме DECT, когда связь с БС ухудшается, он переключается на работу с сетью GSM.

Аппаратура DECT существенно дешевле сотовых систем, что позволяет строить коммерческие сети связи для абонентов с ограниченной мобильностью с тарифами, в 2–3 раза более низкими, чем в сотовой телефонии. Данный стандарт все чаще применяют для телефонизации городских и сельских районов, где кабельные системы по каким-либо причинам неприменимы. Это происходит и в России. Например, сети абонентского радиодоступа на базе аппаратуры Goodwin WLL (компания Goodwin Europe, Россия) уже развернуты в ряде районов Московской области (Куркино, Балашиха, Реутово), в Калининграде, Твери, Таганроге и т. д.

Примером системы беспроводной связи является система Freeset (DCT-1800) фирмы Ericsson (напомним, она была первой DECT-системой связи на рынке). Freeset позволяла устанавливать входящие и исходящие соединения, передавать голосовые и факсимильные сообщения, видеoinформацию, данные, предоставлять услуги ISDN. Она состоит из контроллеров, базовых станций и абонентских терминалов. Один контроллер управляет 80 базовыми станциями. Он подключается к телефонным сетям общего пользования посредством шин E1 (G.703, 2 Мбит/с) или двухпроводных анало-

говых абонентских линий и направляет компрессированные речевые сигналы (32 кбит/с, ADPCM) базовым станциям. Система может поддерживать до 600 абонентов, максимальное удаление БС от контроллера — 2,7 км, радиус зоны обслуживания базовой станции — до 200 м. Основное назначение системы — обеспечить персональной беспроводной связью пользователей на небольшой территории (крупное здание, стройплощадка, стадион и т. д.).

Другая система Ericsson — DRA1900 — предназначена для предоставления беспроводного абонентского доступа (WLL) на существенно больших площадях, чем DCT-1800. К телефонным сетям общего пользования она подключается через АТС AXE-10 (Ericsson) посредством узлового контроллера. Узел доступа системы DRA1900 — объединение шести базовых станций, связанных с узловым контроллером каналом E1. Радиус действия БС — до 5 км. Система DRA обладает значительными возможностями гибкого расширения в зависимости от плотности абонентов и необходимой площади радиопокрытия. Системы DCT-1800 и DRA1900 сертифицированы и в России (сертификаты № ОС/1-РС-859 и ОС/1-РС-860 соответственно). DRA1900 работает в ряде регионов нашей страны, например в Нижегородской области и Тольятти.

Однако огромный размах приобрело производство беспроводных телефонов DECT. Уже в 1999 г. на выставке CeBIT'99 эти изделия демонстрировали свыше 40 фирм-производителей, одна из которых — российская компания Goodwin.

6.5. Аппаратная реализация DECT-устройств

Динамичный рынок аппаратуры DECT (в начале 2000-х увеличившийся на 30% в год) не может обойтись без соответствующей поддержки полупроводниковой индустрии. Действительно, многие производители успели выпустить несколько «поколений» комплектов ИС для DECT. Интегральные компоненты для DECT производят такие известные фирмы, как Analog Devices, GaAsTEK, Hewlett-Packard, Infineon, National Semiconductor, NEC, Philips Semiconductor, ST Microelectronics, Texas Instruments и др.

Рассмотрим устройство DECT-систем на базе комплекта ИС фирмы Philips Semiconductor. Структура телефона-трубки и базовой части принципиально различается только управляющими контроллерами и наличием интерфейса к телефонной линии у базовой станции (рис. 6.3). Интерфейс может быть как цифровым, так и аналоговым.

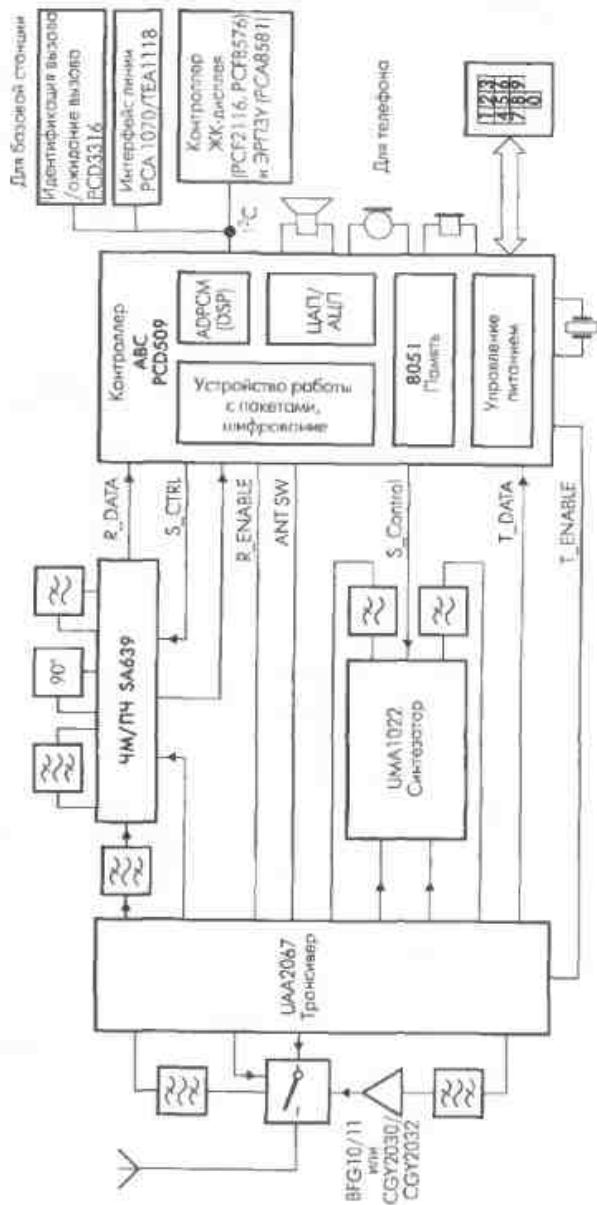


Рис. 6.3. Структурная схема телефона/базовой станции на элементной базе фирмы Philips Semiconductor

Для DECT-приложений Philips выпускает семейство микроконтроллеров PCD509x: PCD5091 – для телефонов, PCD5092–PCD5095 – для базовых станций и PCD5096 – универсальный кодек. Радиотракт формируют высокочастотный трансиверный модуль (включает супергетеродинный приемник с двойным преобразованием частоты) с подавлением помех по зеркальному каналу UAA2067 (рис. 6.4), схема гауссовой частотной модуляции на промежуточной частоте SA639 и двухчастотный синтезатор UMA1022.

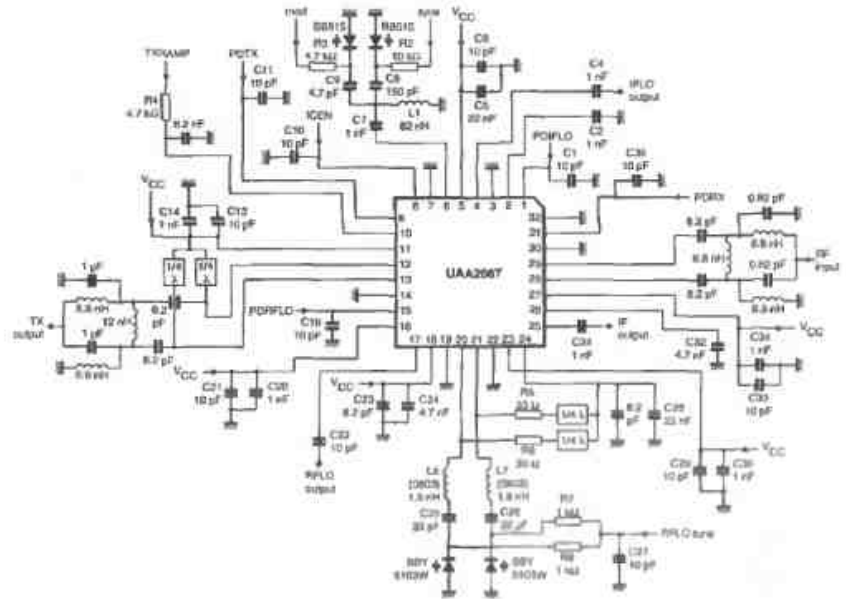


Рис. 6.4. Пример схемы включения трансивера UAA2067

DECT-контроллеры семейства PCx509x (рис. 6.5) представляют собой специализированные схемы на базе управляющего контроллера 80с51 с встроенной памятью и интерфейсом I²C [50]. В зависимости от типа контроллер использует внешнее ПЗУ (PCD5090, 128 кбайт), встроенное ПЗУ (PCD5091, 64 кбайт) или встроенное электрически стираемое репрограммируемое ПЗУ (PCA5097, 64 кбайт). В ПЗУ хранятся программы для управляющего микроконтроллера и встроенного сигнального процессора DSP. Кроме того, контроллер содержит устройство работы с пакетами (BML) и цифровой речевой интерфейс (IOM2 или ADPCM), а также ряд других устройств – параллельные порты ввода/вывода, схемы работы с микрофоном,

динамиком и зуммером, схемы контроля питания батарей, измерения RSSI, управления синтезатором частот и т.д. В той или иной мере различные функциональные блоки работают автономно, взаи-

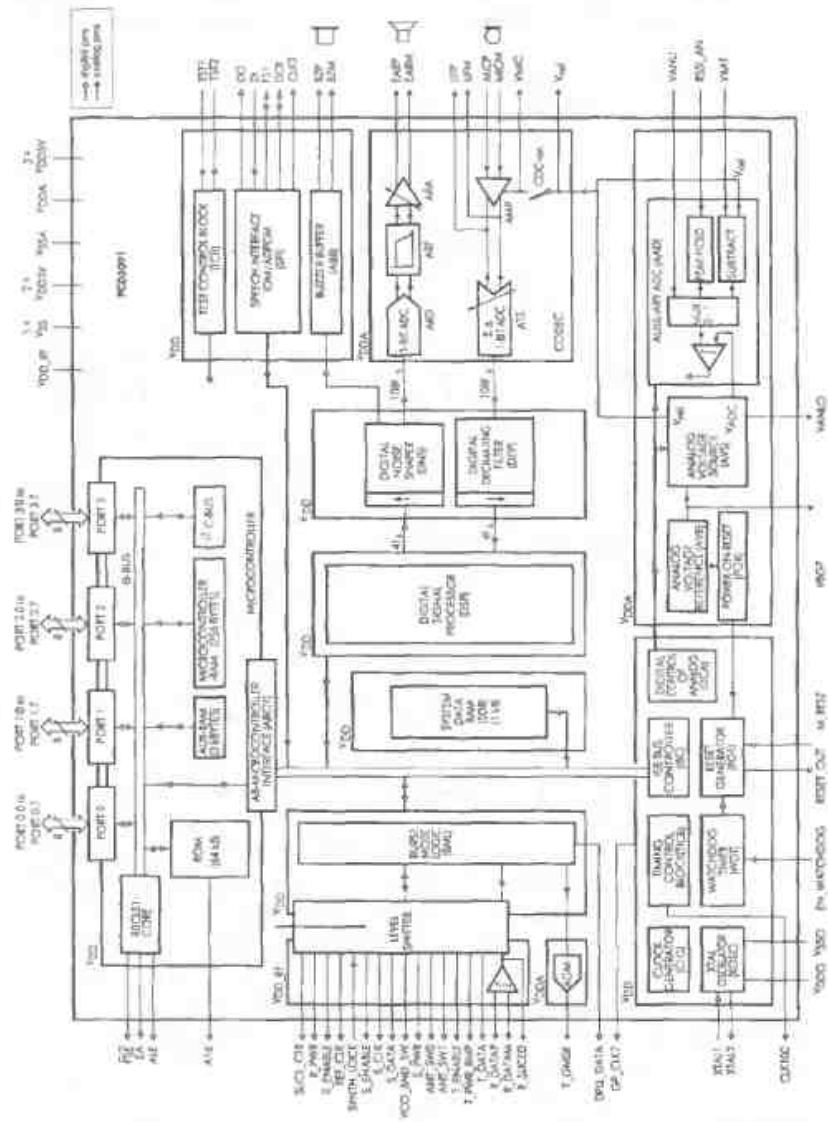


Рис. 6.5. Блок-схема контроллера PCD5091

модействуя через системное ОЗУ посредством внутренней шины ISB. Встроенный DSP-процессор реализует такие функции, как ADPCM-кодирование, эхоподавление, речевой фильтр, программируемое усиление в голосовом тракте, генерация комфортного шума, сигналов вызова и DTMF, детектирование DTMF, подключение автоответчика, конференц-связь и громкоговорящая дуплексная связь. Отметим, что семейство PCD509х предназначено для достаточно простых DECT-систем. Так, не поддерживается режим кластеризации базовых станций, невозможно внешнее управление контроллером или прямой доступ к его встроенным ЗУ.

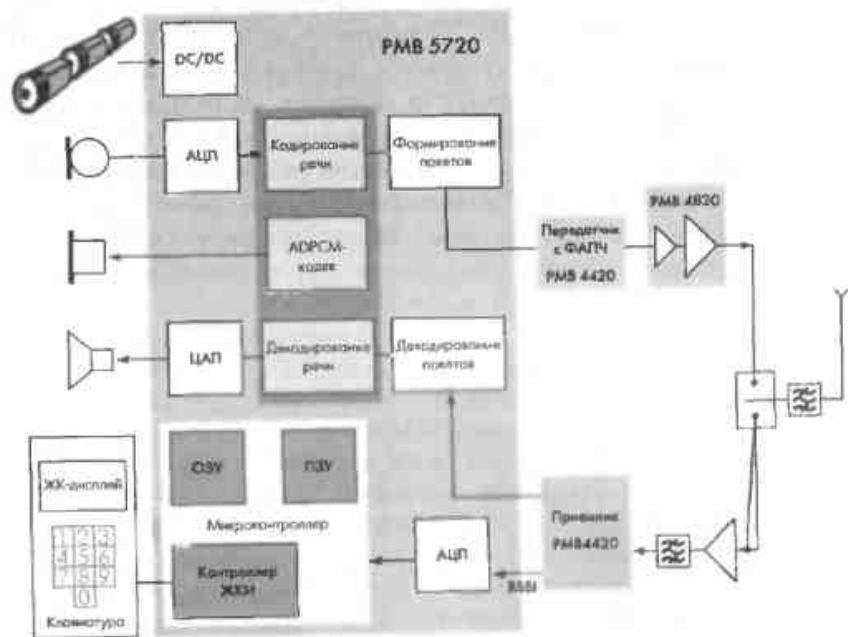


Рис. 6.6. Построение телефона DECT на базе комплекта ИС фирмы Infineon

Другой пример — построение телефона на базе комплекта ИС фирмы Infineon (рис. 6.6). Это уже пятое поколение ИС для DECT данной фирмы (ранее — Siemens Semiconductor). В комплект входят телефонные контроллеры PMB 5720 (для домашних систем), PMB 5722 и 5723 (для бизнес-систем), контроллеры базовых станций PMB 5725, PMB 5735 (домашние системы) и PMB 4729 для малых офисов. Радиотракт поддерживают ИС передатчика с ФАПЧ PMB 4220, уни-

версальный приемник PMB 4420 и кремниевый усилитель для DECT PMB 4820.

Мировая микроэлектронная индустрия готова предоставить изготовителям самые современные компоненты для построения как простых и дешевых устройств, так и сколь угодно сложных и многофункциональных DECT-систем. Тем более что сам стандарт DECT постоянно пополняется новыми возможностями, следовательно, расширяется область его применения, увеличивается разнообразие созданных на его базе устройств. Так, в 1998–1999 годах в него вошли два новых дополнения — стандарт пакетной радиопередачи данных DPSR (DECT Packet Radio Service) и основанный на нем мультимедийный протокол DMAP (DECT Multimedia Access Profile). Устройства, поддерживающие эти стандарты, уже представлены на рынке (например, реализующие доступ в Интернет по каналам DECT). DECT осваивает новые частотные диапазоны, растут скорости передачи данных. Он входит в пул стандартов систем мобильной связи третьего поколения IMT-2000 и продолжает бурно развиваться.

ГЛАВА 7

МОБИЛЬНЫЕ СОТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Сотовая связь — одно из революционных достижений в области беспроводных сетей, ставшее обыденным за последние десять лет. Роль этой технологии в 90-х годах столь же велика, как бум персональных компьютеров в 80-х. Мобильный телефон превратился в привычный предмет обихода, по стоимости приближающийся к обычному телефонному аппарату (а по распространенности уже превзошедший число телефонных аппаратов фиксированной связи). Широкие возможности сетей мобильной связи не могут не привлекать внимание разработчиков различного рода систем — мониторинговых, охранных, коммуникационных и т. д. Смена же поколений сотовой связи столь стремительна, что достижимые технические возможности ощутимо опережают реальную потребность пользователей, это ярко демонстрирует проблема с внедрением сотовых сетей третьего поколения (3G). А специалисты говорят уже о 4G.

Рост сотовых сетей связи носит поистине «взрывной» характер. Число их абонентов уже превысило миллиард — примерно столько, сколько всего абонентов проводной связи. В 2001 г. насчитывалось около 430 млн абонентов сетей GSM (69% всех абонентов мира), 65 млн приверженцев CDMA, 47,1 млн пользователей DAMPS, еще около 58 млн абонентов сетей других стандартов [71]. В России на 1 января 2001 г. было порядка 3,4 млн абонентов — годовой рост составил тогда 152% [72]! К марту 2004 г. их число выросло более чем в 10 раз, достигнув 42,37 млн абонентов. А за 2005 г. базы сотовых операторов России (по числу SIM-карт) выросли на 51,9 млн абонентов и достигли 125,8 млн [1]. Для сравнения — абонентов проводной телефонной связи в РФ чуть больше 41 млн. В мире же число абонентов сотовых сетей уже превысило 2 млрд.

Очевидно, что в подобной ситуации потребность в едином стандарте или по крайней мере в совместимых стандартах весьма остра. К тому же сотовая связь все активнее вторгается в сферу передачи

данных — это и электронная почта, и доступ к ресурсам Интернета, и обмен видеоинформацией и т. п. Но чтобы подобные услуги оказались востребованными, необходимы иные скорости обмена (т. е. превосходящие стандартные для сетей второго поколения (2G) 9,6 или 14,4 кбит/с) и новые принципы организации соединений.

Еще в 1992 г. Международный союз электросвязи (ITU) инициировал работы над стандартом «всемирной подвижной радиосвязи» IMT-2000. Предполагалось, что к 2000 г. появится спецификация сетей подвижной связи, действующая в диапазоне около 2000 МГц и со скоростью передачи данных порядка 2 Мбит/с. Одним из требований была возможность точного определения местоположения мобильных терминалов. Причем речь шла о единой системе телекоммуникаций, объединяющей спутниковые, мобильные, фиксированные виды связи. Надеждам этим сбыться не было суждено, однако некая определенность со стандартами сетей третьего поколения наступила. Но прежде чем говорить о 3G, рассмотрим существующие стандарты сотовой связи.

7.1. Аналоговые стандарты сотовой связи

Первые стандарты сотовой связи появились в конце 70-х годов прошлого века и носили в основном региональный характер. Первая коммерческая сеть сотовой телефонной связи заработала в 1978 г. в Бахрейне (телефонная компания Batelec) на основе оборудования японской компании Matsushita Electric Industrial. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км². К середине 80-х годов насчитывалось уже девять стандартов сотовой связи первого поколения [10].

Первые коммерческие сети сотовой связи в Европе заработали в странах Скандинавии под управлением стандарта NMT-450 (Nordic Mobile Telephone System) в 1981 г. Это был совместный продукт Дании, Норвегии, Финляндии и Швеции. Система работала в диапазонах 453–457,5 МГц (восходящий канал) и 463–467,5 МГц (восходящий канал). Система разделения каналов была частотной, с разносом каналов на 25 (20) кГц и разносом дуплексных каналов на 10 МГц. Передача речи в каналах — чисто аналоговая посредством фазовой модуляции. Служебные сообщения в системе NMT были цифровы-

ми и передавались посредством модуляции FFSK (fast frequency shift keying) — единице соответствовал тон 1200 Гц, нулю — 1800 Гц. Скорость такой передачи составляла 1200 бит/с. Через пять лет появились и варианты систем NMT для 900-МГц диапазона.

Пожалуй, европейская система NMT-450/900 была наиболее распространенной, а в России даже была выбрана в качестве федерального стандарта. Остальные системы, начало эксплуатации которых приходится на 1985–1987 г., гораздо менее известны. Не каждый специалист сегодня вспомнит такие стандарты, как C-450 (Германия), TACS/ETACS (Великобритания), RTMS-101H (Италия) и Radiocom-200 (Франция). Гораздо более известен первый стандарт сотовой связи, действовавший в США, — AMPS.

Первая сеть стандарта AMPS (Advanced Mobile Phone System) заработала 13 октября 1983 г. в Чикаго. Родившись на Американском континенте, этот стандарт распространился по всему миру, понав и в Россию. AMPS рассчитан на диапазон 824–840 и 869–894 МГц, каналы — дуплексные с разносом на 45 МГц, ширина канала 30 кГц. AMPS интересен тем, что на его основе родился первый цифровой стандарт второго поколения — Digital AMPS (DAMPS). Произошло это в 1988 г.

DAMPS — цифровой стандарт второго поколения, действующий в том же диапазоне, что и предшественник. Ширина канала в DAMPS — те же 30 кГц, но применено временное разделение каналов — циклически повторяющиеся кадры с тремя временными интервалами. Речевой кодек — VCELP, 8 кбит/с. Поскольку стандарт американский, его сетевая инфраструктура — ANSI-41. Размер соты — до 20 км. Ряд абонентских устройств поддерживал одновременно DAMPS и AMPS, что было даже удобно, когда удаленность от базовой станции превышала фиксированный в цифровом стандарте радиус соты, поскольку при аналоговой связи это приводило лишь к ухудшению сигнала, но не к разрыву соединения. Однако эра стандартов первого-второго поколений завершалась. Поэтому, в отличие от аналогового прародителя, DAMPS особого распространения в мире получить не успел и уже никогда не успеет.

7.2. Глобальная система мобильной связи GSM

Безусловный лидер по распространенности на мировом рынке — стандарт GSM. Его история началась в 1982 г., когда Европейская конференция администраций почты и телеграфа (CEPT) создала рабочую

группу GSM (Group Special Mobile) для разработки общеевропейской системы подвижной сотовой связи. В 1989 г. работы по GSM перешли под эгиду Европейского института стандартизации электросвязи (ETSI), и в 1990 г. были опубликованы спецификации первой фазы стандарта. В 1993 г. в 22 странах мира действовало 36 сетей GSM. К 1995 г. насчитывалось около 5 млн абонентов, стандарт стал общемировым и расшifровывался уже как Global System for Mobile Communications. За последующие шесть лет число абонентов возросло в 84 раза, что составляет порядка 70% пользователей сотовой связи во всем мире. Примечательно, что такая же доля сторонников GSM и в России.

GSM действует в диапазонах 900 и 1800 МГц (в США — 1900 МГц). В Европе и России в диапазоне 900 МГц мобильный телефон передает (восходящий канал) в полосе 890–915 МГц, принимает (нисходящий канал) в интервале 935–960 МГц (для GSM-1800 — 1710–1785 и 1805–1880 МГц соответственно). Весь диапазон делится на частотные каналы по 200 кГц — в GSM-900 всего 124 канала (124 восходящих и 124 нисходящих), разнос между восходящим и нисходящим каналом — 45/95 МГц (в диапазонах 900/1800 МГц соответственно). Базовая станция поддерживает от 1 до 16 частотных каналов. Таким образом, в GSM реализован частотный метод дуплексирования каналов (FDD).

Что касается доступа к среде передачи, в GSM использован принцип временного разделения канала — TDMA. Частотные каналы разбиты на кадры по 8 временных интервалов (канальные интервалы) длительностью по 577 мкс. Каждому физическому каналу соответствует один определенный временной интервал на определенной частоте. Таким образом, мобильный терминал (MT) передает базовой станции (БС) информацию в течение 577 мкс каждые 4615 мкс. БС связывается с MT точно так же, но на три временных интервала раньше MT (и на частоте на 45 МГц выше), чтобы разнести во времени прием и передачу. Это существенно упрощает аппаратуру MT.

Временные интервалы в GSM бывают пяти типов — нормальный, подстройки частоты, синхронизации, установочный и доступа. Структура нормального временного интервала показана на рис. 7.1. Полезная информация передается двумя блоками по 57 бит. Между ними расположена тренировочная последовательность в 26 бит, ограниченная одnorазрядными указателями PB (Pointer Bit). Интервалы BB (Border Bit) длиной 3 бита ограничивают всю передаваемую последовательность. После трансляции всех 148 бит канального интервала передатчик «молчит» в течение защитного интервала ST

(Shield Time) длительностью 30,44 мкс, что по времени эквивалентно передаче 8,25 бит.

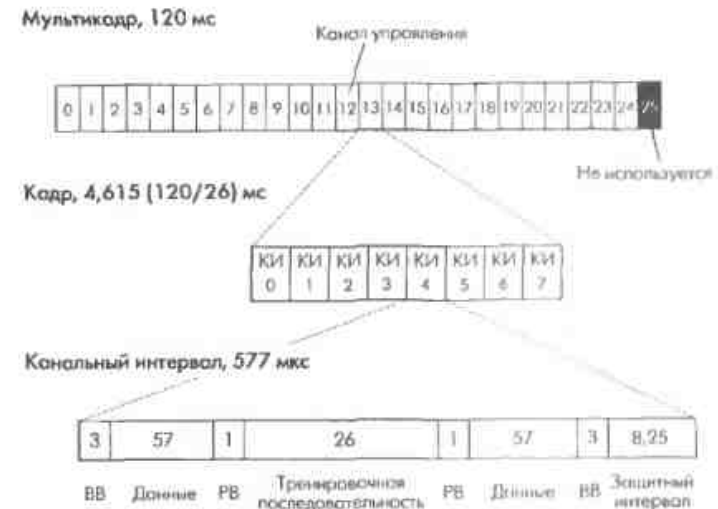


Рис. 7.1. Временное разделение каналов в GSM

Каждые 26 кадров объединены в мультикадр продолжительностью 120 мс. В мультикадре каждый 13-й кадр зарезервирован для канала управления, а в течение каждого 26-го кадра вся система «молчит».

Отметим, что в GSM использован принцип медленных частотных скачков — прием/передача нового кадра может происходить на новой несущей частоте. При этом сохраняется дуплексный разнос в 45 МГц. Начальное значение несущей и последовательность изменения назначаются мобильному терминалу при установлении связи. Модуляция сигнала — двоичная гауссова с минимальным частотным сдвигом GMSK (один бит на символ).

Радиус соты в GSM — до 35 км — ограничен возрастающей временной задержкой распространения сигнала, к которой чувствительна технология TDMA. Сетевая инфраструктура GSM/GPRS основана на системе сигнализации GPRS (SS7) [8]. Для кодирования речи применен кодек VCELP на основе алгоритма RPE-LTP (Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction) со скоростью 13 кбит/с. Скорость передачи данных — до 9,6 кбит/с (по стандартной схеме).

7.3. Стандарт CDMA

CDMA расшифровывается как множественный доступ с кодовым разделением каналов (Code-Division Multiple Access). Сама по себе технология не нова: первая в СССР работа на эту тему — «Основы теории линейной селекции» Д.В. Агеева — была опубликована в сборнике ЛЭИС в 1935 г. Значительно продвинули технологию работы К. Шеннона. До определенного момента CDMA находил применение только в военной и специальной технике из-за сложности аппаратуры для обработки сигналов. Зато такие свойства технологии, как высокая стойкость к помехам и скрытность передачи, в данной области оказались незаменимыми.

С развитием микроэлектроники стало возможным создание недорогих портативных станций CDMA. Лидер в этой области — американская компания Qualcomm, разработавшая спецификацию IS-95 (cdmaOne). Возможно, именно IS-95 и уготована самая долгая жизнь, поскольку на базе этого стандарта развивается одно из направлений сотовой телефонии третьего поколения.

Упрощенно рассмотрим принцип действия CDMA. Различают три вида кодового разделения каналов — расширение спектра методом прямой последовательности (DS), частотных скачков (FH) и временных скачков (TH) [20]. Нам интересуют метод DS, в отечественной литературе его называют передачей на основе шумоподобных сигналов (ШПС). В CDMA-DS каждый бит информационного сигнала заменяется некоторой фиксированной последовательностью определенной длины — базой сигнала. Ноль и единица могут, например, кодироваться инверсными последовательностями. Для каждого канала задается определенная последовательность (код). Спектр сигнала расширяется пропорционально длине базы. Последовательности обычно подбирают ортогональными (скалярное произведение равно нулю). В приемнике происходит вычисление корреляционных интегралов входного сигнала и кодовой последовательности определенного канала. В результате принимается только тот сигнал, который был расширен посредством заданной кодовой последовательности (корреляционная функция выше порогового значения). Все остальные сигналы воспринимаются как шум. Таким образом, в одной полосе могут работать несколько приемопередатчиков, не мешая друг другу. Благодаря широкополосности сигнала снижается его мощность, причем при очень длинной базе — ниже уровня белого шума.

Сильно возрастает помехоустойчивость, а с ней и качество связи — узкополосная помеха не повлияет на широкополосный сигнал.

Кодовая последовательность одновременно является и элементом криптозащиты. Что особенно привлекательно для операторов сотовой связи — упрощается проблема частотного планирования, поскольку все станции работают в одной полосе. Все эти свойства и предопределили успех CDMA.

Естественно, принцип взаимодействия базовой и мобильной станций в стандарте IS-95 гораздо сложнее. Рассмотрим его немного подробнее, поскольку именно этот стандарт лег в основу ряда сетей третьего поколения.

Сети IS-95 занимают практически тот же частотный диапазон, что и сети AMPS: 824–840 и 869–894 МГц. Нисходящий канал (от БС к МТ) всегда на 45 МГц выше восходящего. Ширина канала — 1,25 МГц. Существует и более высокочастотная версия в диапазонах 1890–1930 и 1950–1990 МГц. Там дуплексный разнос — 80 МГц. Ниже мы рассмотрим работу в диапазоне до 900 МГц — в более высокочастотной версии все аналогично, только скорость передачи данных в 1,5 раза выше: до 14,4 кбит/с.

Нисходящий канал содержит 64 логических канала. Логические каналы формируются за счет расширения спектра сигнала последовательностями Уолша (Walsh). Каждая из этих последовательностей представляет собой одну из 64 строк матрицы Адамара (Hadamar). Основное их свойство в том, что все строки матрицы (и их инверсия) взаимно ортогональны.

Способ построения матрицы Адамара прост. Матрица первого порядка $A_1 = [1]$. Матрица A_{2n} образуется по схеме

$$A_{2n} = \begin{bmatrix} A_n & A_n \\ A_n & -A_n \end{bmatrix}.$$

Так, матрица Адамара второго порядка имеет вид

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix};$$

матрица Адамара четвертого порядка

$$A_4 = \begin{bmatrix} A_2 & A_2 \\ A_2 & -A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В стандарте IS-95 используются матрицы Адамара 64-го порядка. Последовательность Уолша отличается от строки матрицы Адамара только тем, что в ней -1 заменена на 0.

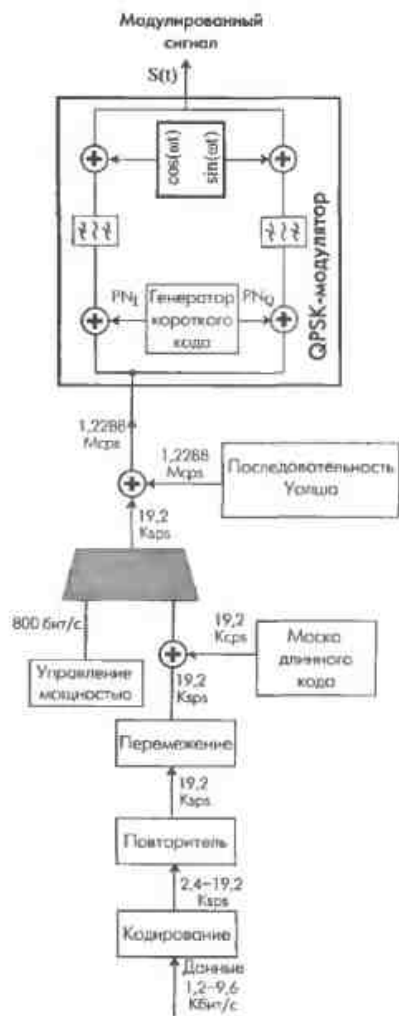


Рис. 7.2. Схема передачи в прямом канале cdmaOne

После расширения последовательностями Уолша скорость потока становится 1,2288 Мбит/с (если быть точным — не бит, а чипов, поскольку бит — понятие информационное, а элементы модулированных последовательностей называют чипами). В результате каждому информационному биту исходного потока соответствует 128 чипов выходной последовательности. Выигрыш в отношении сигнал/шум для расширенного и исходного

Рассмотрим процесс передачи в нисходящем канале (рис. 7.2). Входной поток (данные, оцифрованный голос) (1,2–9,6 кбит/с) подвергается защитному сверточному кодированию с скоростью 1/2 и попадают в повторитель, который в зависимости от условий связи может повторять передачу одного блока данных до восьми раз. Затем данные поступают в блок перемежения, защищающий от групповых ошибок. Фактически это матрица, которую информационные биты заполняют по строкам, а выводятся по столбцам.

Далее поток перемножается с 42-разрядным числом, так называемой маской длинного кода, фактически — идентификационным номером мобильной станции (речь идет о канале передачи трафика, в каналах другого типа маска может формироваться иначе). Это элемент дополнительной криптозащиты. Наконец, поток расширяется посредством последовательностей Уолша (каждый бит перемножается на 64-разрядную последовательность). Каждому из 64 каналов соответствует определенная последовательность. Первая последовательность Уолша закреплена за пилотным каналом.

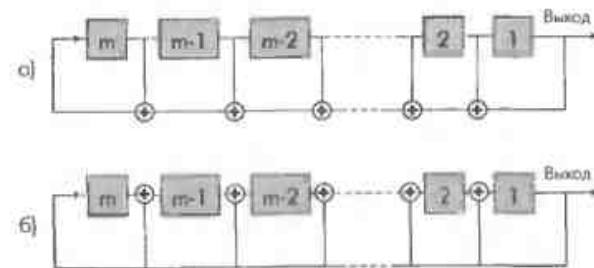
После расширения последовательностями Уолша скорость потока становится 1,2288 Мбит/с (если быть точным — не бит, а чипов, поскольку бит — понятие информационное, а элементы модулированных последовательностей называют чипами). В результате каждому информационному биту исходного потока соответствует 128 чипов выходной последовательности. Выигрыш в отношении сигнал/шум для расширенного и исходного

сигнала составляет $10 \lg 128 = 21$ дБ. Если принять, что на входе приемника допустимо соотношение сигнал/шум в 3 дБ, то передачу теоретически можно вести при уровне сигнала на 18 дБ ниже уровня интерференционных помех.

Прежде чем попасть на модулятор, сигнал дополнительно расширяется псевдослучайной последовательностью с так называемым коротким кодом (период — $2^{15} - 1$) и раскладывается на квадратурные составляющие. Несущая модулируется методом четырехпозиционной фазовой манипуляции — QPSK. Поскольку последовательности Уолша взаимно ортогональны, интерференционные помехи между каналами одной БС практически отсутствуют. Передача ведется пакетами длительностью 20 мс.

Восходящий канал делится на $2^{42} - 1$ логических каналов. Каждой мобильной станции присвоен свой уникальный логический канал на основе 42-битного идентификационного номера. Спектр сигнала в обратном канале расширяется на основе так называемых m -последовательностей (длинного кода). Их генерация происходит в 42-разрядном сдвиговом регистре с обратными связями (рис. 7.3).

Рис. 7.3. Генерация длинного кода (m -последовательности): схема Фибоначчи (а) и схема Галонса (б)



Если начальные значения во всех m узлах регистра не равны 0, генератор на его основе будет выдавать периодическую псевдослучайную последовательность длиной $2^m - 1$. Отличительная особенность m -последовательностей — сумма по модулю 2 (операция «исключающее ИЛИ») m -последовательности с той же последовательностью, смещенной по фазе, дает ту же самую последовательность, но с другим фазовым сдвигом $M(t/T) \oplus M(t/T + \varphi_1) = M(t/T + \varphi_2)$. Благодаря этому свойству с помощью идентификационного номера — маски длинного кода — можно задавать начальную фазу последовательности (рис. 7.4). Таким образом, вся система использует один вид псевдослучайной последовательности (ПСП) с очень

большим периодом повторения, а селекция логических каналов происходит за счет выбора ее фазы. ПСП обладают всеми свойствами случайных последовательностей, с высокой автокорреляцией при совпадении фаз.



Рис. 7.4. Генератор длинного кода с заданным фазовым сдвигом в cdmaOne

Передача в восходящем канале во многом аналогична передаче в нисходящем (рис. 7.5). Входная информация после сверточного кодирования (со скоростью кодирования 1/3), повторителя и блока перемежения попадает в блок ортогональной модуляции, где каждая группа из 6 бит заменяется соответствующей 64-разрядной последовательностью Уолша. Далее поток последовательностей Уолша перемножается на ПСП (длинный код). При этом каждый элемент последовательности Уолша преобразуется в четыре элемента ПСП. Затем поток квадратируется посредством так называемого короткого кода с периодом $2^{15} - 1$. Короткий код необходим для первичной синхронизации МТ с БС.

Получающиеся в итоге две последовательности имеют период повторения порядка 2^{57} , что при скорости цифрового потока 1,2288 Мчп/с эквивалентно 3700 годам. Они используются для модуляции несущей. В восходящем канале применяется квадратурная фазовая модуляция со сдвигом O-QPSK (см. рис. 7.5), каждому символу соответствуют два бита. Этот вид модуляции позволяет снизить требования к линейности усилителей передающего тракта МТ. В результате всех преобразований каждый бит исходного сообщения заменяется 256 элементами транслируемой последовательности.

Прием сигналов происходит в обратном порядке. Для выделения «своего» сигнала используют цифровые корреляторы, вычисляющие корреляционную функцию с заданной последовательностью Уолша (в МТ) либо с m -последовательностью (БС) в заданной фазе. МТ обычно содержит несколько корреляторов для работы одновременно с несколькими базовыми станциями. Это важно при переходе из

соты в соту, когда терминал принимает сигналы от различных БС и, сравнивая их качество, выбирает предпочтительную. Кроме того, несколько корреляторов обеспечивают прием при многолучевом распространении сигнала, что может улучшить качество связи.

Важная особенность стандарта IS-95 – гибкое управление мощностью излучения МТ. В пределах соты уровни принимаемых БС сигналов должны быть одинаковыми независимо от удаления МТ. Для этого мощность МТ регулируется по специальному алгоритму в диапазоне порядка 80 дБ с шагом 1 дБ каждые 1,25 мс. Кроме того, в IS-95 скорость работы голосового кодека не постоянна, как в GSM, а может меняться в зависимости от интенсивности речи от 8 до 1,2 кбит/с. Эти особенности позволяют очень гибко регулировать загрузку в сети, не загружая соту избыточной информацией.

Одна БС может поддерживать до 64 каналов. Однако часть из них – служебные: пилотный, синхронизации, вызова. Оказывают влияние и соседние БС. Однако при фиксированной связи БС поддерживает до 40–45, при подвижной – до 25 каналов передачи трафика. И все это на одной частоте! Технология CDMA требует точной, до микросекунд, синхронизации БС. Для этого используют сигналы глобальной системы позиционирования GPS. Радиус соты – до 20 км, сетевая инфраструктура – ANSI-41.

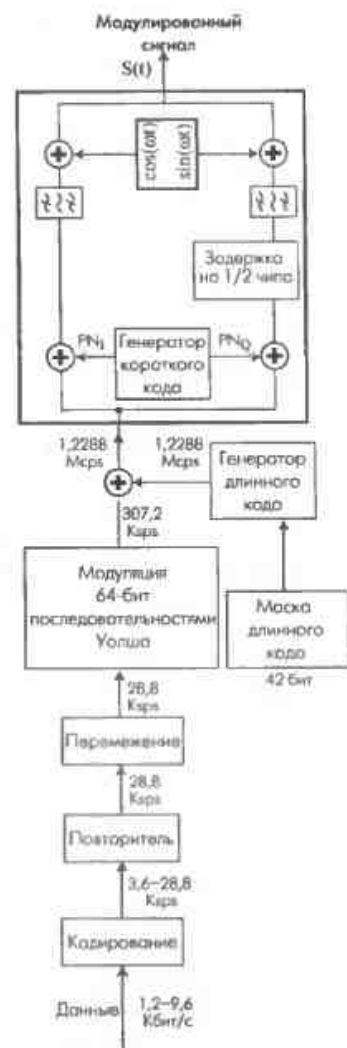


Рис. 7.5. Схема передачи в обратном канале cdmaOne

7.4. Третье поколение сотовой связи

7.4.1. Основные технологии третьего поколения

Основной недостаток систем мобильной связи второго поколения — низкая скорость передачи данных — 9,6–14,4 кбит/с. В рамках же IMT-2000 стояла задача достичь в сетях 3G скорости потока до 2 Мбит/с для малоподвижных абонентов и до 384 кбит/с — для мобильных. В мире сформировались два глобальных партнерских объединения, формирующих стандарты 3G, — 3GPP и 3GPP2 (3G Partnership Project). В первое вошли ETSI (Европа), подкомитет P1 телекоммуникационного комитета ANSI (США), ARIB и TTC (Япония), SWT (Китай) и TTA (Южная Корея). Участники 3GPP сумели согласовать особенности своих подходов к технологии широкополосной CDMA (WCDMA) с частотным (FDD) и временным (TDD) дуплексированием, представив ITU проекты IMT-DS и IMT-TC соответственно. В основу легло европейское предложение UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access, радиointерфейс наземного доступа к системе UMTS) — UTRA FDD и UTRA TDD. Отметим, что в качестве одного из стандартов IMT-2000 предложено дальнейшее развитие технологии микросотовых сетей DECT (проект IMT-FT).

Члены объединения 3GPP2 предлагают фактически эволюционный путь — варианты развития технологий DAMPS (UWC-136) и cdmaOne (cdma2000). Данные предложения представлены ITU как проекты IMT-SC и IMT-MC.

Таким образом, намечилось два пути: революционный — там, где есть свободный частотный ресурс, и эволюционный — в остальных регионах. Рассмотрим их.

В 1996 г. в городе Чиста (Швеция) компания Ericsson запустила первую опытную сеть с технологией WCDMA. Эта технология легла в основу проекта наземного мобильного сегмента европейской универсальной системы телекоммуникаций UMTS. Было предложено два варианта WCDMA — с частотным и временным разносом прямого и обратного каналов (FDD WCDMA и TDD WCDMA) соответственно для парного (предполагается 2110–2170 и 1920–1980 МГц) и непарного спектров частот.

Технология основывается на расширении спектра методом прямой последовательности в полосе 5 МГц на канал. Изначально определенная скорость потока чипов 4,096 Мчип/с для согласования с другими стандартами была снижена до 3,84 Мчип/с. Таким образом, система может поддерживать требуемые 2 Мбит/с для мало-

подвижных абонентов и 384 кбит/с — для мобильных. Предусмотрена возможность применения интеллектуальных антенных систем (Smart-антенн с цифровым формированием диаграммы направленности). Принципы технологии FDD WCDMA во многом аналогичны cdmaOne (конечно, WCDMA гораздо сложнее). Одно из принципиальных отличий — сеть на базе FDD WCDMA может быть асинхронной (возможен и синхронный режим).

Для случаев, когда спектральный диапазон ограничен — нет возможности выделять частоты под парные каналы 5 МГц, — проработана версия WCDMA TDD с временным дуплексированием каналов. Принцип прост: весь временной диапазон представляет последовательность равных канальных интервалов. В течение каждого из них в каждом из логических каналов (с кодовым разделением) происходит передача в одном направлении — от БС или от МТ. Таким образом, в определенные промежутки все каналы либо восходящие, либо нисходящие. Соотношение и последовательность восходящих/нисходящих канальных интервалов может гибко изменяться в зависимости от интенсивности трафика в обе стороны. Это крайне важно для многих приложений с асимметричной передачей данных (например, доступ в Интернет). По сравнению с FDD WCDMA сети с TDD должны быть синхронными, в остальном же их параметры практически совпадают.

Развитием метода WCDMA TDD стала система TD-SCDMA, созданная совместно компанией Siemens и китайской Академией телекоммуникационных технологий (China Academy of Telecommunications Technology — CATT). Это стандарт физического уровня беспроводных сетей 3G, одобренный ITU и объединением стандартизирующих организаций 3GPP как часть пула стандартов UMTS. TD-SCDMA (технология CDMA с одной несущей и временным дуплексированием) ориентирована для работы в зонах с высоким дефицитом частотного ресурса — именно такова ситуация в КНР, связанная с высочайшей плотностью населения (в несколько раз выше, чем в густонаселенной Европе).

Сама технология доступа представляет собой комбинацию трех механизмов: временного разделения дуплексных каналов (TDD), временного мультиплексирования каналов (TDMA) и кодового мультиплексирования каналов (CDMA). Обмен происходит циклически повторяющимися кадрами (фреймами) длительностью 5 мс, разделенными на семь временных интервалов (тайм-слотов). Кроме того, в каждом тайм-слоте возможно формирование до 16 CDMA-каналов на основе 16 кодовых последовательностей. Важнейшая особенность —

предусмотрена возможность гибкого распределения тайм-слотов исходя из фактически передаваемого трафика. Например, в асимметричных приложениях (доступ в Интернет) для восходящего канала можно выделить один тайм-слот, для нисходящего — остальные шесть.

Ширина одной полосы TD-SCDMA 1,6 МГц. Скорость передачи модуляционных символов 1,28 Мчип/с. Это, вместе с переменным числом тайм-слотов во фрейме, назначенных одному соединению, позволяет добиваться скорости передачи данных в широчайшем диапазоне: от 1,2 кбит/с до 2 Мбит/с. Заявленная дальность передачи — 40 км, допустимая максимальная скорость движения мобильного абонента — не менее 120 км/ч.

Важнейшее достоинство TD-SCDMA — эффективное использование спектра. В технологиях с частотным разносом восходящего/нисходящего каналов на одно соединение всегда выделяются две частотные полосы. И проблема не только в том, что эти две полосы с разносом в 45–220 МГц еще надо найти. При асимметричной передаче (а именно таковы многие мультимедийные приложения) частотный ресурс одного из каналов в большой степени фактически пропадает, поскольку для соединения назначается два частотно-разнесенных канала: приемный и передающий. В случае TD-SCDMA такого не происходит, поскольку частотная полоса одна и соотношение входящего/нисходящего трафика можно гибко варьировать.

Не менее важно, что разработчики TD-SCDMA предусмотрели ее гибкую интеграцию с GSM-сетями, а также мягкий переход к WCDMA-сетям благодаря поддержке сигнализации и протоколов верхних уровней как GSM, так и WCDMA. Более того, первые телефоны стандарта TD-SCDMA были двухмодовыми, на основе GSM-чипсета с дополнительной СВИС поддержки TD-SCDMA.

WCDMA (UMTS) изначально разрабатывалась как замена сетей GSM с возможностью плавного перехода. Поэтому ее сетевая инфраструктура совместима с MAP/GSM. Кроме того, она ориентирована на глобальные сети с пакетной коммутацией (IP, X.25). Операторы могут создавать «островки» WCDMA в особо густонаселенных районах, постепенно расширяя их. Поэтому все абонентские терминалы для WCDMA в Европе будут поддерживать GSM. Однако первая сеть WCDMA начала действовать в Японии (оператор — компания NTT DoCoMo) в 2002 г., где телефонов GSM никогда не было. Для японских операторов WCDMA привлекательна из-за ее высокой абонентской емкости.

Уже действующие сети — это построенная инфраструктура, сформированная и развивающаяся абонентская база и, что самое глав-

ное, — огромные вложенные средства и определенная инвестиционная перспективность (если, конечно, сеть успешна). Не менее важно, что за оператором сети закреплен частотный диапазон. Поиск путей усовершенствования происходит постоянно. Однако, прежде чем строить принципиально новую сеть (WCDMA), необходимо рассмотреть возможности развития существующих.

Значительный потенциал заложен в стандарте IS-95. Прямым его развитием стала спецификация IS-95b. Она позволяет объединять до восьми логических каналов. Теоретически достижимая скорость при этом $14,4 \times 8 = 115,2$ кбит/с. Реально работающие сети IS-95b обеспечивают передачу до 64 кбит/с.

Следующий шаг развития IS-95 — проект cdma2000, который в итоге должен удовлетворять требованиям IMT-2000. Предусматривалось три стадии развития cdma2000: 1X, 3X и cdma2000 DS (прямая последовательность). Последний вариант технически аналогичен WCDMA, и потому работы над ним были прекращены.

CDMA 1X (CDMA 1XRTT) позволяет увеличить число логических каналов до 128 в той же спектральной полосе 1,25 МГц. При этом реальная скорость — до 144 Мбит/с. Первая такая сеть была организована в Южной Корее (оператор — SK Telecom).

Компания Qualcomm предложила технологию увеличения скорости HDR (High Data Rate). Ее основная идея — гибкое увеличение числа положений вектора сигнала (символов) при фазовой модуляции, следовательно, увеличение числа бит на символ. В стандартной модуляции несущей в CDMA (квадратурная фазовая, QPSK) используются четыре символа, каждый определяет два бита. Если увеличить число возможных символов до восьми (8PSK), каждый отчет сигнала будет определять три бита и скорость передачи возрастет в полтора раза. Очевидно, что, чем хуже условия связи, тем меньше символов может распознать приемник (т.е. тем больший фазовый сдвиг способен распознать его детектор). Поэтому в зависимости от зашумленности эфира вид модуляции в HDR меняется. Технология HDR позволяет достигать пиковых скоростей порядка 2,4 Мбит/с в стандартной полосе 1,25 МГц. О работе над аналогичной технологией — 1Xtreme — заявила и компания Motorola.

Спецификация CDMA 3X — вторая фаза проекта cdma2000. Обозначение 3X указывает на утроение спектральной полосы канала cdmaOne: $1,25 \times 3 = 3,75$ МГц. При этом в обратном канале происходит передача методом прямой последовательности в полосе 3,75 МГц. В прямом же канале данные передаются параллельно по трем стандартным IS-95 каналам шириной 1,25 МГц (технология с несколь-

кими несущими, MC) (рис. 7.6). В результате скорость может превышать 2 Мбит/с. Поскольку технология базируется на IS-95, BC в сетях cdma2000 требуют синхронизации. Существенно, что вполне возможно дальнейшее масштабирование: 6X, 9X и т. д. с соответствующим ростом производительности или емкости.

Важнейшая особенность cdma2000 — его полная совместимость с предыдущими фазами, вплоть до cdmaOne. Не требуется нового частотного диапазона и существенного изменения аппаратуры. Фактически возможно плавное улучшение параметров существующих сетей IS-95 до требований IMT-2000. Правда, возникает глобальная проблема: совместимость стандартов cdma2000 и WCDMA, причем как на уровне терминалов, так и сетевой инфраструктуры (MAP/GSM и ANSI-41). Впрочем, обе технологии поддерживают протокол IP, что может стать для них объединяющей платформой.



Рис. 7.6. Спектр сигналов в технологии cdma2000 3X

Отметим, что, поскольку в России сетей CDMA практически нет, казалось, что вариант cdma2000 с его достоинствами — не для нас. Однако это утверждение опровергнуто появлением сетей стандарта cdma2000-450, работающих в диапазоне 450 МГц. Они пришли на смену сетям аналогового сотового стандарта NMT-450.

7.4.2. Переходные технологии GPRS и EDGE (сети 2,5G)

Плавный переход к сетям 3G крайне привлекателен и для операторов сетей с технологией TDMA — GSM и DAMPS. Методов повышения быстродействия сетей GSM несколько. Изначальная скорость передачи данных в них составляла 9,6 кбит/с. Однако по каждому

каналу через 4,615 мс передается эквивалент 156-разрядного пакета, следовательно, максимально возможная теоретическая скорость в GSM-канале 33,8 кбит/с. Существенная доля этой полосы отведена для служебной информации, сигнализации, а также алгоритмов защиты от ошибок и криптозащиты. Оставшаяся часть полосы используется для передачи оцифрованной речи со скоростью 13 кбит/с. Скорость передачи данных еще ниже, поскольку при стандартной схеме они следуют через речевой кодек. Изменив алгоритм защитного кодирования, удастся увеличить скорость до 14,4 кбит/с.

Следующим шагом стало введение схемы HSCSD (высокоскоростная передача данных по коммутируемым каналам). Она предусматривает объединение нескольких канальных интервалов. Так, при объединении двух интервалов возможна скорость 19,2 ($9,6 \times 2$) и 28,8 ($14,4 \times 2$) кбит/с. Для этого в основном необходимы изменения в программах поддержки протоколов, не затрагивающие аппаратной части и инфраструктуры сети. Более высокие скорости (например, $9,6 \times 4 = 38,4$ кбит/с) требуют модернизации аппаратуры мобильных телефонов. Дальнейшее увеличение скорости, например до 76,8 кбит/с ($9,6 \times 8$), ограничено сетевой инфраструктурой (64 кбит/с в канале между BC и коммутатором).

«Прорывным» стало внедрение технологии пакетной передачи GPRS — дальнейшего развития HSCSD. В самом деле, для сотовых систем второго поколения сеть с коммутацией каналов — атавизм. Введение пакетной коммутации делает мобильные сети легко совместимыми с IP- и X.25-сетями, создавая тем самым прекрасную платформу для перехода к WCDMA.

При пакетной коммутации данные передаются через свободные от речевого трафика канальные интервалы. Совершенно реальными становятся скорости свыше 100 кбит/с (теоретический предел — $33,8 \times 8 = 270,4$ кбит/с). Мобильный терминал может одновременно поддерживать голосовое соединение и обмен данными без ухудшения качества речи.

Одно из важнейших достоинств пакетной коммутации — очень быстрое установление соединения. Абонент занимает канал только в момент передачи. Поэтому тарификация может происходить на основе реально переданной информации (числа пакетов), а не пропорционально времени нахождения в сети, как при коммутации каналов. Скорости обмена могут гибко меняться. Кроме того, пакетный режим позволяет мобильному телефону работать как персональная радиостанция в режиме постоянно установленного соединения (виртуального), т. е. можно разговаривать, не нажимая ни на какие кнопки.

ки. Голос при этом передается по IP-протоколу в пакетном режиме, используя технологию GPRS. Поскольку трафик расходуется только при непосредственной передаче данных, все остальное время телефон остается «на связи» (точнее, в состоянии постоянной готовности к связи, собственно соединение при GPRS устанавливается за пренебрежимо малое время), но пользователь за это не платит.

Чтобы внедрить технологию GRPS в существующие сети GSM, их инфраструктуру достаточно дооснастить оборудованием пакетной передачи (основные устройства — плюзовые и управляющие узлы, GGSN и SGSN), а каждый GSM-контроллер — блоками управления пакетной связью (PCU). Развивать GRPS-сеть можно постепенно, оснащая ее узлами GGSN и SGSN.

Дальнейшим развитием пакетной передачи стала технология EDGE (Enhanced Data for Global Evolution, изначально вместо Global стояло GSM) [59, 57]. В ее основе — изменение метода модуляции несущей и адаптивная схема защитного кодирования. Напомним, в GSM применяется модуляция GMSK с одним битом на символ.

В EDGE предусмотрена модуляция 8PSK с тремя битами на символ. Таким образом, скорость передачи утраивается. Предусмотрены два режима EDGE: с коммутацией пакетов (EGRPS, Enhanced GRPS) и с коммутацией каналов (ECSD, Enhanced Circuit Switched Data). Скорости в одном канале передачи увеличиваются соответственно до 69,2 и 38,4 кбит/с. В режиме коммутации каналов возможно объединение канальных интервалов, как в технологии HSCSD.

Режим пакетной передачи предусматривает девять скоростей [57], отличающихся схемой защитного кодирования и видом модуляции несущих. Скорость автоматически изменяется от пакета к пакету в зависимости от условий в эфире. На физическом уровне протокол EDGE совпадает с GSM, включая структуру кадров и мультикадра (только разряды PB включены в блоки данных, см. рис. 7.1). При этом общая скорость на несущую до 384 кбит/с, что позволяет рассматривать EDGE как технологию сетей третьего поколения.

EDGE может послужить базой для эволюции не только сетей GSM, но и DAMPS. В январе 1998 г. консорциум UWCC (Universal Wireless Communications Consortium) принял EDGE за основу дальнейшего развития сетей DAMPS, создав концепцию UWC-136. Она предусматривает расширение полосы канала DAMPS с 30 до 200 кГц с соответствующим ростом скорости. Данный проект внесен на рассмотрение ИТУ как система 3G (проект IMT-SC). На платформе EDGE возможна и интеграция сетей DAMPS с сетями GSM.

Отметим, что прорабатываются два варианта EDGE-сетей: COMPACT и Classic. Последний ориентирован на стандартные GSM-системы, тогда как COMPACT — это решение в условиях ограниченного частотного ресурса. Сети COMPACT могут занимать диапазон шириной всего в 600 МГц. При этом БС должны быть синхронизированы, например, с помощью сигналов системы GPS.

7.5. Развитие сетей третьего поколения

Естественно, возникает вопрос: нужны ли сети 3G? Тревогу вызвали результаты уже первых аукционов по продаже лицензий на право предоставлять услуги 3G. В Великобритании общая сумма продаж лицензий составила 34 млрд долларов, в Германии — 46 млрд долларов. Возмещать операторам такие затраты будут пользователи их услуг. Захотят ли они ими пользоваться, если есть более дешевые альтернативные решения?

Готовность рынка принять данную технологию невелика. Это подтверждают события во Франции, где на четыре 3G-лицензии нашлось лишь два оператора-претендента при «умеренной» цене лицензии — около 4,5 млрд долларов. Кроме того, технические возможности и пользовательские приложения — вещи разные. Просмотр видеороликов в мчащемся автомобиле потрясает воображение инженера, но нужен ли такой сервис массовому пользователю? Тем более на малом экране портативного устройства.

С другой стороны, достижения производителей элементной базы для устройств 3G не могут быть проигнорированы рынком. Кроме того, сети 3G нельзя рассматривать просто как беспроводную телефонию. Это — высокоскоростные БСПИ со всеми вытекающими последствиями. Важнейшее из них — в 8 раз более эффективное, по оценкам экспертов, использование емкости сети [28]. Разумеется, при наличии соответствующих информационных сервисов. Это означает, что падает удельная себестоимость инфраструктуры сетей. Если затраты для ввода одного абонентского номера GSM составляют, по разным оценкам, 320–350 долларов, то при эволюционном переходе к сетям UMTS дополнительные затраты не превышают 50 долларов, а потребности в услугах передачи данных неуклонно растут. Так, в августе 2003 г. средний доход от передачи данных у операторов Западной Европы составил 15% от общего объема и продолжает расти. Предполагается, что в 2005 г., с учетом распространения услуг 3G-сетей, этот показатель составит 30%.

Сегодня лидерство во внедрении 3G уверенно захватили страны Юго-Востока. 2003 г. можно назвать первым годом эксплуатации 3G. В 2002 г. японская корпорация NTT DoCoMo первой построила коммерческую 3G-сеть и начала активно оказывать услуги. Через год ее 3G-услугами пользовались 6,8 млн человек. Однако этого крупнейшего японского оператора обогнала компания KDDI, стартовавшая позднее. За полтора года к ее 3G-сети подключилось более 10 млн абонентов. Заметим, что к началу 2003 г. общее число абонентов 3G в Японии составляло лишь 7,161 млн, причем всего абонентов мобильной связи в этой стране тогда было 75,656 млн человек. В конце же 2003 г. услугами связи 3G пользовались более 60 млн человек, и ежемесячно их число увеличивается более чем на 3,5 млн. Всего коммерческие услуги 3G предоставляются более чем в 30 странах мира: развернуто 70 сетей стандарта cdma2000 и 12 сетей стандарта UMTS. В 2003 г. доля мирового рынка производимого оборудования 3G составляла 30%, к 2005 г. предполагалось ее увеличение до 75% [28].

Необходимо сделать существенную оговорку. Термин «услуги 3G» крайне расплывчат; из статистических данных зачастую невозможно понять, о какой же технологии идет речь. Например, сегодня самая массовая 3G-технология — cdma2000. Но она подразумевает плавный переход от 2G-стандарта IS-95a (cdmaOne). При этом сохраняется полная обратная совместимость. Иными словами, оператор может постепенно дооснащать 3G-оборудованием свою CDMA-сеть, превращая ее в 3G-сеть cdma2000, а все «старые» телефоны как работали, так и будут продолжать работать. С технологией WCDMA ситуация принципиально иная, поэтому таких сетей гораздо меньше. Таким образом, очевидно, что, говоря о 3G-услугах, имеют в виду 3G-сети. Возможность же получения 3G-услуг зависит от наличия 3G-телефонов, которых в Европе, да и во всем мире, пока немного. Практически все развернутые 3G-сети имеют двухмодовый режим работы (2,5G/3G) и используются операторами для выявления числа абонентов, готовых оплачивать услуги, не связанные с передачей голоса и SMS. Подавляющее большинство абонентов таких сетей, хотя именуется «абонентами услуг 3G сетей», в реальности пользуются обычными 2,5G-телефонами. Отсюда берутся те многие миллионы абонентов 3G-сетей.

Тем не менее с внедрением 3G-технологий европейские и американские операторы испытывают проблемы. На лицензии потрачены огромные деньги, их надо возвращать. Как подсчитали аналитики из инвестиционного банка Schroder Salomon Smith Barney, лицензии окупятся только в том случае, если каждый европеец будет допол-

нительно приносить оператору связи не менее 500 евро ежегодно. В результате операторы все чаще приходят к выводу о необходимости объединения своих ресурсов в проектах по развертыванию 3G-сетей.

Гонконгская компания Hutchison Whampoa объявила о решении создать сотовую связь 3G в Западной Европе. Она действует под учрежденной ею торговой маркой «3» (65% акций «3» принадлежит Hutchison, еще 20% владеет NTT DoCoMo) и к 2003 г. уже вложила в проект порядка 16,7 млрд долларов. Hutchison активно реализует свои планы создания 3G-сетей в Великобритании, Италии, Швеции, Австрии и других странах. Благодаря усилиям Hutchison к концу марта 2003 г. первые 60 тыс. европейцев (50 тыс. в Италии и 10 тыс. в Великобритании) смогли оценить связь третьего поколения. Зона обслуживания абонентов сети UMTS в Великобритании составляет 70% территории (4,3 тыс. базовых станций), в Италии — 50% (3,2 тыс. базовых станций), соответственно 200 и 400 тыс. абонентов. Деятельность Hutchison в области 3G не ограничена Европой. Она запустила 3G-сеть и в Австралии, под тем же брендом «3», как и в Европе.

Китай пока не спешит внедрять сети 3G. В частности, в докладе «Управление и развитие China Telecom в 2003 г.» представитель компании ZTE (производитель телекоммуникационного оборудования) заявил, что оператор China Telecom выберет в качестве стандарта сотовой связи третьего поколения W-CDMA, а не TD-SCDMA. Этот оператор строит опытную тестовую сеть в семи китайских городах, включая Шанхай.

В России о технологиях 3G пока говорить рано. В то же время в нашей стране уже появилась «3G-технология» — cdma2000 в диапазоне 450 МГц.

ГЛАВА 8

ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СВЯЗИ

Переходя к рассказу о персональных беспроводных сетях передачи данных, нельзя не остановиться на технологии сверхширокополосной связи — направлении не то чтобы совсем новом, но обретшем в последние годы второе дыхание. Из сугубо специальной технологии для особых случаев (главным образом в военной области) оно обещает превратиться, в частности, в основу для сверхвысокоскоростных персональных БСПИ.

8.1. Терминология и краткая история

До 1989 г. для обозначения сверхширокополосных систем пользовались понятиями сигналов «без несущей», «импульсных», «несинусоидальных» и т. п. Определение термина «сверхширокополосные устройства» (UWB) введено агентством DARPA Министерства обороны США в 1990 г. и скорректировано Федеральной комиссией связи США (FCC) в 2000 г. По определению FCC, к UWB-устройствам относятся все системы со спектральной полосой не менее 500 МГц, а также устройства, у которых ширина спектральной полосы по уровню -10 дБ относительно максимума мощности излучения составляет по крайней мере 20% от значения центральной частоты (показатель широкополосности $\mu = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L) \geq 0,2$, где f_H — верхняя граница спектральной полосы по уровню -10 дБ; f_L — нижняя граница) [60]. В отечественной науке к сверхширокополосным относили сигналы, у которых ширина спектра $\Delta\omega$ соизмерима с центральной частотой ω_0 : показатель широкополосности $\mu = \Delta\omega/\omega_0 \approx 1$, в то время как у узкополосных сигналов $\mu \ll 1$ [4]. Кстати, само понятие «сверхширокополосный сигнал, система» впервые введено известным отечественным специалистом Л.Ю. Астаниным.

Работы в области сверхширокополосных систем начались в конце 50-х годов в связи с развитием радиолокационной техники как

в США, так и в СССР. В США в то время несколько научных центров занимались исследованиями отклика микроволновых систем (например, антенных элементов) на короткоимпульсное (наносекунды и менее) воздействие. Такие работы в рамках создания радаров на фазированных антенных решетках вели и в исследовательском центре Sperry (позднее — Sperry Rand Corporation). В 1965 г. сотрудник этого центра Джеральд Росс возглавил группу исследователей «электромагнитных явлений во временной области» (time domain electromagnetics). В результате был опубликован ряд пионерских работ, например [64]. В 1972–1973 г. Д. Росс и другой сотрудник Sperry Rand Corporation, Кеннет Роббинс, получили основополагающие патенты в области сверхширокополосных систем — «Передающая и детектирующая система для генерации и приема импульсных сигналов без искажений для короткоимпульсной коммуникационной системы» [23] и «Короткоимпульсный приемник» [22]. Работы Росса и Роббинса заложили основу короткоимпульсной связи и локации в США. Достаточно сказать, что Росс является автором (самостоятельно или в соавторстве) свыше 40 патентов США в данной области. Всего же к 1989 г. сотрудники Sperry Rand получили около 50 патентов США в области UWB-систем и различных аспектов их применения.

Одновременно с Россом и Роббинсом аналогичные исследования проводил Хеннинг Хармут (Американский католический университет), опубликовавший в 1969–1984 г. ряд статей и книг, посвященных UWB. В Римском исследовательском центре ВВС США работами по применению UWB-радаров занимался Паул Ван Эттен, обнаруживший ряд важных эффектов. В 1974 г. Морей разработал UWB-радарную систему для исследования подземных объектов [24], что явилось толчком для нового направления — UWB-радаров для геолокации и локации «сквозь стены». Важным этапом в развитии UWB-технологий стало появление стробоскопических осциллографов с частотой сканирования выше 10 ГГц как за рубежом (Hewlett-Packard), так и в СССР. Не оставались в стороне и такие исследовательские центры, как Ливерморская и Лос-Аламосская национальные лаборатории. Отметим работы компании Multispectral Solutions, создавшей по заказу правительства США при участии Д. Росса коммуникационную систему с высокой скрытностью и помехоустойчивостью (с малой вероятностью обнаружения и противодействия, LPI/D), принятую в 1987 г. Список исследователей и работ можно продолжать. Однако к 80-м годам основные теоретические исследования в области UWB уже были завершены, созданы первые гражданские

и военные системы (радиолокация, геолокация, позиционирование, связь и т. д.) [49, 48].

Аналогичные исследования велись и в СССР. Насколько можно судить по публикациям, почти все они (как и за океаном) были связаны с радарной тематикой. Российские и зарубежные эксперты отмечают работы Зернова, Карцевича, Астанина, Кобзарева, Костылева, Кардо-Сысоева, Глебовича, Мелешко и др. Кстати, первые работы по UWB системам связи с кодовым разделением каналов были выполнены в России в середине 80-х годов В.В. Крыловым в Горьковском политехническом институте. Однако с начала 90-х годов многие работы оказались если не замороженными, то сильно заторможенными.

Прорыв произошел в конце 80-х, когда в США несколько компаний очень активно начали продвигать свои UWB-системы гражданского назначения. Наиболее агрессивной из них была компания Time Domain. Ее в 1987 г. основал Ларри Фуллертон, тогда же получивший свой первый патент в области сверхширокополосной связи [25]. За десять лет работы компания со своей технологией PulsOn превратилась в одного из лидеров в области портативных UWB коммуникационных систем и радаров, в ее активе — свыше 60 патентов по тематике UWB. У Time Domain появилось немало последователей и конкурентов [68]. Отметим, что способов формирования сверхширокополосных сигналов — великое множество, и описанный ниже механизм «импульсного радио» далеко не единственный.

8.2. «Импульсное радио»

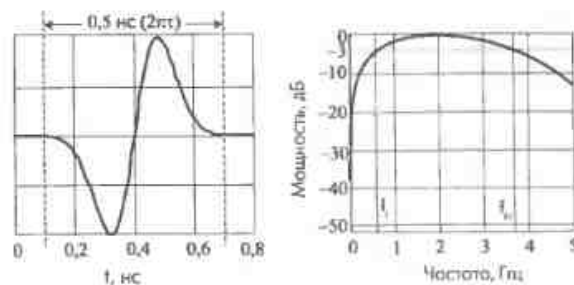
Рассмотрим сущность технологии UWB на примере связанной UWB-системы, описанной в патенте Л. Фуллертона «Полудуплексная система и метод связи» [27]. Передача ведется короткими (20–0,1 нс) импульсами, следующими друг за другом с интервалом 2–5000 нс (очевидно, что значения параметров в реальных системах могут быть иными). Импульс — моноцикл Гаусса (рис. 8.1) — описывается первой производной от функции распределения Гаусса:

$$V(t) = A \frac{\sqrt{2e}}{\tau} t e^{-(t/\tau)^2}, \quad (8.1)$$

где A — амплитуда импульса; τ — временная константа, характеризующая затухание (длительность импульса $2\pi\tau$). Спектральная плотность сигнала

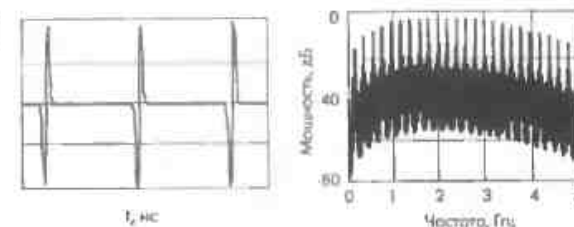
$$V(\omega) = A\omega\tau^2\sqrt{2\pi e}. \quad (8.2)$$

Рис. 8.1. Моноцикл Гаусса и его спектральная характеристика



Очевидно, что центральная частота такого сигнала $f_c = 1/2\pi\tau$. По уровню -3 дБ полоса сигнала ограничена частотами $f_L = 0,319f_c$ и $f_H = 1,922f_c$. Таким образом, ширина полосы сигнала в диапазоне 3 дБ составляет около 160% от центральной частоты. Для импульса длительностью 0,5 нс центральная частота равна 2 ГГц, а ширина полосы — около 3,2 ГГц. Регулярная последовательность таких импульсов не несет никакой информации, ее спектр имеет выраженный «гребенчатый» характер (рис. 8.2), следовательно, подобный сигнал может интерферировать с другими радиотехническими системами.

Рис. 8.2. Спектр регулярной последовательности импульсов



В «импульсном радио» (термин Фуллертона) информация кодируется посредством временной позиционно-импульсной модуляции. Смещение импульса относительно его «штатного» положения в последовательности вперед задает 0, назад — 1. Время смещения не превышает четверти длительности импульса (рис. 8.3). Так, в последовательности импульсов 0,5 нс с межимпульсным интервалом 100 нс импульс, пришедший на 100 пс раньше, — это 0, на 100 пс позже — 1. Один информационный бит кодируется последовательностью многих импульсов, например 200 импульсов на бит.

Однако возникает проблема: как разделить каналы передачи? Для этого «штатное» положение каждого импульса сдвигают на вре-

мя, пропорциональное текущему значению некоторой псевдослучайной последовательности (разделение посредством временных скачков, Time Hopping). При этом время сдвига на один-два порядка

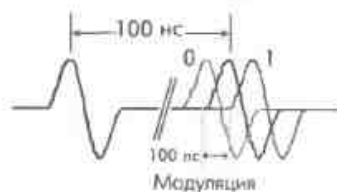


Рис. 8.3. Временная импульсно-позиционная модуляция

выше, чем смещение при временной модуляции. В результате спектр сигнала существенно сглаживается (рис. 8.4), становится шумоподобным и уже не мешает другим устройствам, работающим в той же полосе. Применяя систему ортогональных кодов для управления временными задержками импульсов, теоретически можно в одной полосе создавать тысячи голосовых каналов связи [66]. По утверждению Time Domain, пессимистические оценки дают от 200 до 1000 дуплексных каналов со скоростью 64 кбит/с на одну базовую станцию без использования специальных алгоритмов цифровой обработки сигналов [63]. Таким образом, в отличие от технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA), системы импульсного радио используют ортогональные псевдослучайные последовательности не для расширения спектра сигнала (спектр короткого импульса и так достаточно широк), а только для сглаживания его спектральной характеристики, формирования отдельных каналов связи и защиты от помех. С другой стороны, «импульсное радио» можно рассматривать как предельный случай CDMA, в котором полностью отказались от несущей или, что физически почти то же самое, длительность выходного импульса сделали равной одному периоду несущей.

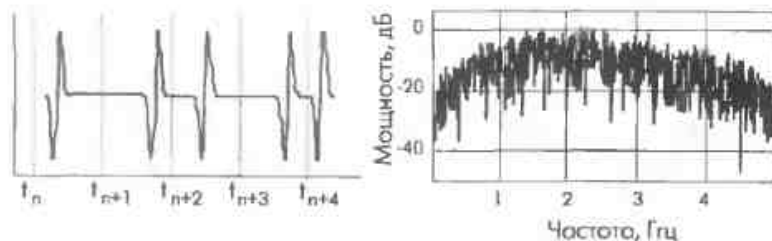


Рис. 8.4. Спектр последовательности импульсов после импульсно-кодовой модуляции

Кроме временного кодирования можно применять и дополнительные поднесущие — информационный сигнал предварительно модулируется тем или иным традиционным методом модуляции (AM, FM,

PM, FSK, PSK, PCM и т.д.). Далее модулированные поднесущие подвергаются временной модуляции (вместо информационного сигнала модулируется поднесущая, модулированная информационным сигналом) [26].

Приемное устройство «импульсного радио» функционально представляет собой приемник (детектор) прямого преобразования и коррелятор. На более привычном языке его можно назвать синхронным приемником без промежуточного преобразования частоты ($f_{пч} = 0$) с системой ФАПЧ, где частота гетеродина заменяется импульсной последовательностью, позволяющей выбрать канал связи. Будучи синхронизированным с передатчиком и зная псевдослучайную последовательность канала, коррелятор определяет отклонения принятых импульсов, формируя на выходе +1, если сигнал, например, пришел на 100 пс раньше окончания межимпульсного интервала, -1 — если на 100 пс позже и 0 — в остальных случаях. Эти значения накапливаются в интеграторе. В результате узкополосная помеха от передатчика с непрерывной несущей или сигнал от другого импульсного передатчика способны помешать приему отдельных импульсов, но не информационного бита в целом. Накопленным значением коррелятора от случайных помех будет 0. Разумеется, описанный метод корреляционного детектирования последовательности сверхкоротких импульсов далеко не единственный.

8.3. Сверхширокополосные системы — достоинства и проблемы

Одно из существенных достоинств «импульсного радио» — отсутствие интерференции прямо распространяющегося сигнала с его отражениями от различных объектов. Переотражения — бич для многих связных и локационных технологий (за исключением широкополосных шумоподобных систем связи). Именно из-за них затруднена связь внутри помещений, в условиях сложного рельефа и т.п. В импульсном радио отраженный сигнал попадет в коррелятор с задержкой и будет восприниматься как случайная помеха, никак не воздействуя на прямой сигнал. Кроме того, благодаря широкополосности затухание короткоимпульсного сигнала в различных средах достаточно мало — короткие импульсы легко проходят сквозь различные препятствия, поскольку подавление сигнала происходит не во всем диапазоне.

Оценить помехозащищенность «импульсного радио» можно, используя понятие усиления обработки. В системах с расширением спектра усиление обработки определяется как отношение ширины полосы канала к ширине полосы информационного сигнала. Так, для систем расширения спектра методом прямой последовательности с шириной канала 5 МГц и информационным сигналом 10 кГц усиление составит 500 раз (27 дБ). Такой же сигнал, передаваемый «импульсным радио» с шириной полосы 2 ГГц, будет усилен в 200 тыс. раз (53 дБ). Если один бит задается последовательностью 200 импульсов с частотой следования 10 млн импульсов в секунду (через 100 нс) и шириной импульса 0,5 нс, скорость информационного потока составит 48,8 кбит/с, а эффективное усиление — 46 дБ. При этом усиление за счет отношения ширины межимпульсного интервала к длительности импульса ($100/0,5 = 200$) составит 23 дБ, поскольку 200 импульсов задвигают один бит.

Из-за высокого эффективного усиления системы UWB могут работать с очень малой средней мощностью передатчика. Так, в октябре 1997 г. Time Domain продемонстрировала полнодуплексную связь по технологии UWB с центральной частотой 1,7 ГГц на дистанции свыше 900 м и скоростью 32 кбит/с. При этом средняя мощность передатчика составляла около 2 мВт. Система одновременно определяла расстояние с точностью до 3 см. Разработана полнодуплексная система 1,3 ГГц передачи со скоростью 39–156 кбит/с на дистанции до 16 км. Средняя мощность ее передатчика 250 мкВт. Также компания создала демонстрационную беспроводную локальную сеть со скоростью передачи 5 Мбит/с и радиусом действия свыше 10 м (через две стены внутри здания) при мощности излучения 50 мкВт. С такой же средней мощностью работает радар RadarVision 1000.

Средняя мощность излучения UWB-устройств может быть чрезвычайно низкой, поэтому они не должны мешать существующим радиотехническим системам, работая в одном с ними диапазоне. Поскольку UWB-сигнал распределен по столь широкому спектру, обнаружить его, а тем более перехватить или заглушить весьма проблематично. Разумеется, совокупность таких свойств, как высокая помехозащищенность, скрытность, малое энергопотребление и простота реализации, не могла не заинтересовать военные и государственные организации. Собственно, в США (равно как в СССР) практически любая деятельность в этой сфере до конца 70-х носила закрытый характер. До недавнего времени в США заказчиками UWB-систем могли выступать только правительственные и военные организации, работы имели статус правительственных про-

грамм. Ситуация изменилась в 1994 г., когда в США был снят ряд ограничений, и UWB-технологии стали стремительно развиваться. Не последнюю роль сыграла и относительная техническая простота в сочетании с возможностью интегральной реализации сверхширокополосных систем. Однако по-прежнему для использования таких систем требовалось специальное разрешение FCC, что существенно ограничивало сбыт продукции создателей UWB-систем.

Естественно, подобное положение существенно ограничивало сбыт продукции создателей UWB-систем и закрывало дорогу к ним для многих инвесторов. Масло в огонь подливал тот факт, что средний уровень излучения маломощных UWB-устройств не превосходит разрешенный при непреднамеренном излучении частью 15 («Правила использования радиочастотных устройств») раздела 47 (Телекоммуникации) Кодекса федерального регулирования FCC (Code of Federal Regulations — CFR) США. Эта часть правил CFR распространяется на различные электрические приборы, компьютеры и т. д., излучающие электромагнитную энергию как побочный эффект (допустимый уровень излучения для электромагнитной совместимости). Но передающие UWB-устройства под это положение не попадают, поскольку излучают преднамеренно, хотя и с допустимой средней мощностью. Раз так, то работать в диапазоне, уже занятом другими системами, им нельзя. А сверхширокополосные устройства неминуемо «залезают» в «чужие» диапазоны.

В начале 1998 г. три американские компании — U.S. Radar, Time Domain и Zircop — обратились в FCC с запросом о разрешении использовать их UWB-системы (радары, способные «видеть» сквозь стены и коммуникационные системы) в порядке эксперимента на безлицензионной основе, так же как устройства, на которые распространяется действие 15-й части CFR относительно непреднамеренных источников излучения. Петиции этих фирм, а также общее давление производителей и разработчиков привели к тому, что 10 мая 2000 г. FCC разрешила опытное безлицензионное использование UWB-систем. А уже через два года появились четкие правила по применению сверхширокополосных систем, которые были окончательно подтверждены в 2004 г.

В результате для UWB-систем появились четкие нормы разработки и применения (рис. 8.5), а перспективы перед UWB-системами открываются огромные. Обобщенно, в диапазонах частот 1990–10 600 МГц допустимый уровень эквивалентного изотропного излучения (EIRP) составляет $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц ($-41,3$ дБм/МГц). При малой мощности UWB-системы способны передавать данные со скоростями свыше

20 Мбит/с, причем внутри помещений и объектов со сложной архитектурой. Телефония, локальные сети, системы «последней мили» и т. д. — во всех этих областях могут использоваться UWB-системы.

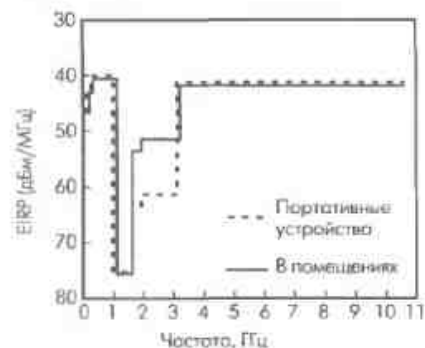


Рис. 8.5. Разрешенные в США уровни мощности эквивалентного изотропного излучения (EIRP) для сверхширокополосных устройств

Кроме этого, указанные системы могут широко применяться в локации, системах позиционирования, медицинской технике, транспорте и т. д. Недаром ряд крупнейших фирм, среди которых Intel и Siemens, инвестируют средства в UWB-компании. Многие производители полностью подготовились к открытию массового рынка. В частности, Time Domain разработала комплект ИС PulsOn для UWB-приложений. По утверждению Time Domain, на основе данного комплекта ИС можно создавать законченные решения систем импульсного радио стоимостью ниже 20 долларов [63].

8.4. Особенности аппаратной реализации сверхширокополосных систем

Любая UWB-система включает антенную систему, формирующую короткие импульсы электромагнитного излучения; мощный импульсный ключ, управляющий антенной системой; устройство модуляции/демодуляции; прецизионный высокочастотный опорный генератор, приемный детектор и коррелятор (рис. 8.6). Отметим, что в UWB-системе нет мощных усилителей, ее приемник — прямого преобразования (без гетеродина и элементов частотной фильтрации), устройства детектирования и модуляции/демодуляции достаточно просты и реализуются средствами обычной цифровой логики, без сложных алгоритмов цифровой обработки сигналов. Антенные системы также достаточно просты по исполнению и могут изготавливаться непосредственно на печатных платах.

Один из важнейших элементов для UWB-технологии — мощные импульсные ключи, особенно актуальные для локационных си-

стем. Требования к коммутирующим элементам достаточно жесткие — они должны открываться (закрываться) на сотни пикосекунд (или по крайней мере иметь фронты открывания/закрывания длительностью порядка 10–100 пс) с мегагерцевой частотой повторения при очень высокой стабильности. При этом коммутируемое напряжение измеряется сотнями и тысячами вольт.

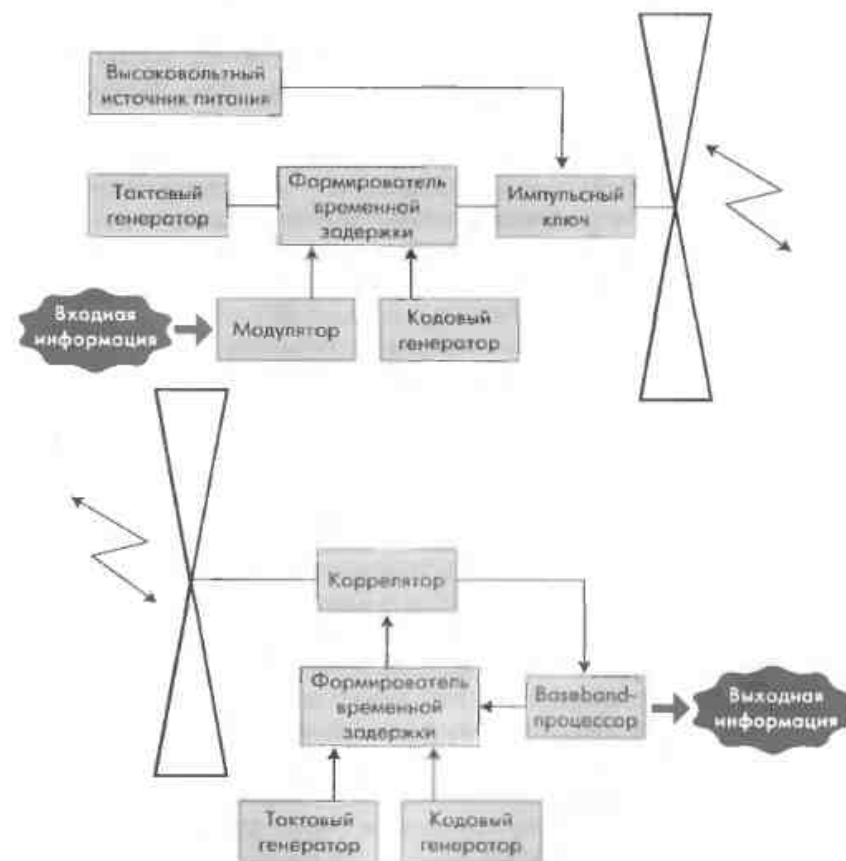


Рис. 8.6. Структура приемопередаточной UWB-системы

В начале 80-х годов в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были открыты два интереснейших явления — эффекты сверхбыстрого восстановления напряжения и сверхбыстрого обратимого пробоя в высоковольтных переходах. Это открытие привело к созданию принципиально новых полупроводниковых приборов, способных коммутировать большие

мощности в малых временных промежутках, в том числе приборов на задержанной ударно-ионизационной волне и дрейфовых приборов с режимом восстановления. Идея и ее материальное воплощение принадлежат группе разработчиков во главе с А.Ф. Кардо-Сысоевым, за что они были удостоены Государственной премии СССР.

На основе этих приборов создано семейство генераторов различного назначения, позволяющих формировать сверхкороткие импульсы нано- и пикосекундной длительности с мощностью до десятков мегаватт и частотой повторения до десятков мегагерц, контролируя при этом их временное положение с точностью 10 пс. Максимальное импульсное напряжение может достигать десятков киловольт, а импульсные токи – тысяч ампер. С ростом частоты повторения пиковая мощность падает, но по-прежнему остается намного выше, чем полученная с помощью любых других полупроводниковых устройств. Это позволяет с успехом применять разработанные генераторы в локационных и связных UWB-системах. Причем ресурс этих приборов чрезвычайно высок.

Отметим, что даже сегодня вопросы массового применения UWB-технологии окончательно не разрешены. Продолжаются исследования интерференции UWB-устройств с другими радиотехническими системами. Многие эксперты, в частности, справедливо отмечают, что стоит человеку прикоснуться к антенне UWB-передатчика, как спектр сигнала из непрерывного может стать гребенчатым – все равно что подключить режекторный фильтр. Но уже почти готовы стандарты на сверхширокополосные персональные БСПИ IEEE 802.15.4a и 802.15.3a (работы по последнему заморожены, но это ненадолго). Практически все ведущие мировые полупроводниковые и телекоммуникационные фирмы так или иначе вовлечены в работу в области UWB-технологий, и новые результаты можно ожидать в самое ближайшее время. Отрадно, что в этом процессе участвуют и отечественные специалисты из Института радиотехники и электроники Российской академии наук (ИРЭ РАН), работая над созданием сверхширокополосных низкоскоростных систем связи на основе модуляции хаотических сигналов [73].

ГЛАВА 9

ПЕРСОНАЛЬНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ

Персональные беспроводные сети передачи данных стали появляться сравнительно недавно – в конце 90-х годов. Их отличительная особенность – малый радиус действия, порядка 10 м. Поскольку такие системы предназначены массовому потребителю, они должны быть недорогими. Однако лишь к концу 90-х годов развитие микроэлектроники позволило производить для таких устройств интегральную (следовательно, дешевую) элементную базу. Открывшиеся перспективы привели к тому, что практически одновременно появилось сразу несколько разработок персональных БСПИ.

К 1998 г. техническое решение проблемы стандартной беспроводной СПД было уже реализовано – в июле 1997 г. появился стандарт IEEE 802.11, радио-Ethernet, предоставивший широкие возможности для построения профессиональных сетей со скоростью обмена до 11 Мбит/с в радиусе действия в ряде стран диапазоне ISM (900, 2400 и 5800 МГц). Он же определил технологию сетей связи в ИК-диапазоне (до 16 Мбит/с). Основной недостаток IEEE 802.11 – относительно высокая (для персональных сетей) сложность и стоимость оборудования. Однако на базе данной спецификации были разработаны беспроводные технологии Bluetooth и HomeRF (SWAP) – более простые и дешевые решения для потребительского рынка. Несколько позднее в игру включился комитет IEEE 802, образовавший рабочую группу 15 для разработки стандартов высоко- и низкоскоростных персональных БСПИ (IEEE 802.15.3 и 4). Особняком стоит группа компаний, реализующих «нестандартные» технологии сверхширокополосной связи (UWB), которые по определению могут быть только с очень малым радиусом действия.

Кроме того, следует отметить еще один класс «нестандартных» изделий для персональных БСПИ. Речь идет об однокристалльных радиотрансиверах (радиомодемах) и готовых модулях на их основе. Характерный пример – продукты норвежской компании Nordic

Semiconductor. Эта фирма производит семейство однокристалльных трансиверов для диапазонов 430, 826/915 и 2400 МГц. В диапазоне 915 МГц выходная мощность трансиверов 10 мВт, в диапазоне 2,4 ГГц — 1 мВт. Пример устройства для диапазона 2,4 ГГц — ИС μ RF2401. Отличительная особенность таких устройств — предельно упрощенный протокол обмена физического уровня и максимально облегченная структура пакетов с данными (минимум служебной информации). Поэтому подобные приборы незаменимы при проектировании простых специальных сетей. Но в этом случае разработчику приходится самому решать проблемы управления работой сети, арбитража доступа к каналу и т. п.

9.1. Стандарт Bluetooth

9.1.1. Стандарты Bluetooth и HomeRF

HomeRF — это название созданной в марте 1998 г. группы производителей компьютерного и бытового оборудования (Home Radio Frequency Working Group; в первый год существования в нее вошло свыше 90 фирм, включая Intel, Compaq, Ericsson, Hewlett-Packard и Microsoft). Она организовывалась для разработки открытого протокола распределенного беспроводного доступа SWAP (Shared Wireless Access Protocol), который должен был лечь в основу радиосети HomeRF. Впоследствии вместо понятия SWAP в названии спецификации стали использовать HomeRF. Первая версия спецификации HomeRF появилась 17 декабря 1998 г., последняя (HomeRF 2.01) — 1 июля 2002 г. На этом цели рабочей группы были выполнены, и в январе 2003 г. она была расформирована.

Как следует из названия, стандарт HomeRF задумывался как беспроводная домашняя СПИ, аналог известной к тому времени проводной Ethernet-подобной сети HomePNA (Home Phone Line Networking Alliance), в качестве носителя использовавшей уже проложенную телефонную линию. Для нормальной работы сети HomeRF необходим host-компьютер (или устройство, выполняющее его функции), что явно снижает стоимостную привлекательность и удобство развертывания данной сети.

Идеология Bluetooth иная — это универсальный радиointерфейс, связывающий друг с другом самые разные устройства и не требующий дорогой аппаратной поддержки. Однако устройства Bluetooth сегодня реально используют в основном для замены провода радиointерфейсом (например, в качестве беспроводной гарнитуры для

сотовых телефонов), несмотря на широчайший спектр заложенных в нем возможностей. Рынок такого рода приложений пока во много раз превосходит рынок действительно сетевых устройств. Возможно, именно поэтому прекрасно проработанный для применения именно для сетевых задач стандарт HomeRF пока не нашел массового применения. С одной стороны, его вытесняют Bluetooth-устройства, с другой — системы стандарта IEEE 802.11, которые за последние пять лет существенно подешевели, лишив тем самым HomeRF основного перед ними преимущества — низкой стоимости. Поэтому более детально рассмотрим именно стандарт Bluetooth, как первую действительно массовую технологию персональных БСПИ.

Основные характеристики технологий Bluetooth и HomeRF приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Сравнительные характеристики технологий Bluetooth и Home RF

Показатель	HomeRF	Bluetooth
Вид модуляции	Шумоподобный сигнал, метод частотных скачков	Шумоподобный сигнал, метод частотных скачков
Число скачков в секунду	50	1600
Мощность передатчика, мВт	100	100
Скорость обмена данными, Мбит/с	1 или 2*	1, 2, 3
Способ модуляции	Двух- или четырехуровневый ЧМ	Двухуровневый ЧМ
Количество устройств в сети	До 127	Не ограничено
Защита информации	Blowfish data security	40- и 64-битное шифрование
Радиус действия, м	50	10–100

* Возможно до 10 Мбит/с.

9.1.2. Появление и развитие Bluetooth

В далеком 908 г. у ютландского короля Гарма Старого и его супруги Тиры родился сын Харальд. Ему была уготована великая судьба. Харальд I Блаваанд (в поздней транскрипции — Bluetooth, Синезубый), сумев подчинить своей воле разрозненных викингов, объединил Данию с Южной Норвегией и Южной Швецией, создав единое Датское королевство. Он же способствовал распространению в Скандинавии христианства, что бесспорно послужило единению культур. Прошло

почти одиннадцать веков. В феврале 1998 г. компании Ericsson, IBM, Intel, Toshiba и Nokia решили объединить свои усилия для создания технологии беспроводного соединения мобильных устройств, организовав специальную рабочую группу SIG (Special Interest Group). И прозвище короля Харальда I — Bluetooth — вновь стало символом объединения. Видимо, свою роль сыграло и то, что основы технологии были еще в 1994 г. проработаны шведской компанией Ericsson. Уже в октябре 1998 г. появилась первая версия Bluetooth 0.7, описывавшая лишь протоколы физического уровня (baseband) и уровня соединения (Link Manager). А 26 июля 1999 г. была опубликована первая открытая версия Bluetooth 1.0a. Она уже включала раздел с правилами использования технологии Bluetooth (включая правовые аспекты) всем мировым сообществом.

Уже в 2000 г. в Bluetooth SIG входили 1883 фирмы (на порядок больше, чем в группе HomeRF). Новую технологию поддержали производители элементной базы, программного обеспечения, портативных компьютеров, сотовых телефонов, звуковоспроизводящей аппаратуры и др. Сегодня стандарт Bluetooth признан всем мировым сообществом. В феврале 2001 г. появилась версия Bluetooth 1.1, вобравшая в себя доработки и исправления, а также ряд новых разделов. Именно версия 1.1 оказалась наиболее массово поддерживаемой производителями аппаратуры.

Успех Bluetooth привел к тому, что между Bluetooth SIG и IEEE было достигнуто соглашение, в соответствии с которым спецификация Bluetooth 1.1 вошла в стандарт IEEE 802.15.1 (опубликован 14 июня 2002 г.) «Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)» («Спецификация управления доступом к беспроводному каналу и физического уровня беспроводных персональных сетей»).

Однако на этом Bluetooth SIG свою деятельность не прекратил. 5 ноября 2003 г. он выпустил новую версию — Bluetooth 1.2, существенно доработанную и повысившую гибкость Bluetooth-систем. А 15 октября 2004 г. появилась последняя на сегодня версия Bluetooth 2.0 + EDR (Enhanced Data Rate), предусматривающая повышение скорости передачи данных с 1 до 3 Мбит/с.

9.1.3. Архитектура и логическая структура сети Bluetooth

Рассказывая об основных принципах Bluetooth, будем основываться на спецификации Bluetooth 1.1, а затем отметим новшества, привнесенные версиями 1.2 и 2.0 + EDR.

Стандарт Bluetooth описывает пакетный способ передачи информации с временным мультиплексированием. Радиообмен происходит в полосе частот 2400–2483,5 МГц (в США и ряде других стран — безлицензионный диапазон). В радиотракте применен метод расширения спектра посредством частотных скачков (FHSS — frequency hopping spread spectrum, в отечественной литературе его еще называют псевдослучайной перестройкой рабочей частоты — ППРЧ). Способ модуляции — двухуровневая частотная манипуляция с фильтром Гаусса (GFSK — binary Gaussian Frequency Shift Keying), т. е. один модуляционный символ представляет один информационный бит.

Метод частотных скачков подразумевает, что вся отведенная для передачи полоса частот подразделяется на определенное количество подканалов шириной 1 МГц каждый. Канал представляет собой псевдослучайную последовательность (ПП) скачков по 79 радиочастотным подканалам (табл. 9.2). Каждый канал делится на временные сегменты продолжительностью 625 мкс, причем каждому сегменту соответствует определенная несущая (подканал). Передатчик «перескакивает» с несущей на несущую синхронно с приемником в последовательности, определяемой номером канала. За секунду может происходить до 1600 частотных скачков. Такой метод обеспечивает конфиденциальность и некоторую помехозащищенность передач. Последняя обусловлена тем, что если переданный по какому-либо подканалу пакет не был принят, то приемник сообщает об этом и передача пакета повторяется на одном из следующих подканалов, уже на другой частоте.

Таблица 9.2. Разделение полосы частот на подканалы в стандарте Bluetooth

Страна	Диапазон, МГц	Несущая частота подканалов, МГц	Допустимые номера подканалов, k
Европа* и США	2400,8–2483,5	2402 + k	0...79
Япония	2471,8–2497,8	2473 + k	0...23
Испания	2445,8–2475,8	2449 + k	0...22
Франция	2446,5–2483,5	2454 + k	0...22

* Кроме Испании и Франции.

Протокол Bluetooth поддерживает логические соединения типа «точка-точка» и «точка-многоточка». Два или более использующих один и тот же канал устройства образуют пикосеть (piconet). Одно из устройств работает как основное (master), а остальные — как подчиненные (slaves). В одной пикосети может быть до семи активных под-

чинных устройств, при этом остальные подчиненные устройства находятся в состоянии «парковки», оставаясь синхронизированными с основным устройством. Взаимодействующие пикосети образуют «распределенную сеть» (scatternet).

В каждой пикосети действует только одно основное устройство, однако подчиненные устройства могут входить в различные пикосети. Кроме того, основное устройство одной пикосети может являться подчиненным в другой (рис. 9.1). Пикосети не синхронизированы друг с другом по времени и частоте — каждая из них использует свою последовательность частотных скачков. В одной же пикосети все устройства синхронизированы по времени и частотам. Псевдослучайная последовательность скачков уникальна для каждой пикосети и определяется физическим адресом ее основного устройства. Длина цикла псевдослучайной последовательности — 2^{27} элементов.

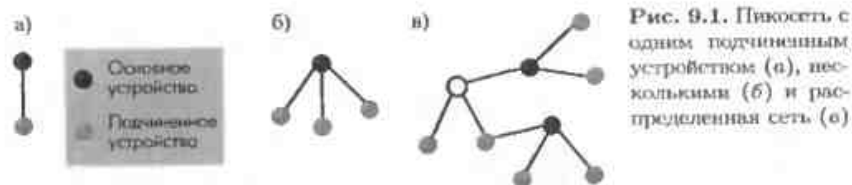


Рис. 9.1. Пикосеть с одним подчиненным устройством (а), несколькими (б) и распределенная сеть (в)

В стандарте Bluetooth предусмотрена дуплексная передача на основе разделения времени (time division duplexing — TDD). Основное устройство передает пакеты $f(k)$ в нечетные временные сегменты, а подчиненное устройство — в четные (рис. 9.2). Пакеты в зависимости от длины могут занимать до пяти временных сегментов. При этом частота канала не меняется до окончания передачи пакета (рис. 9.3).

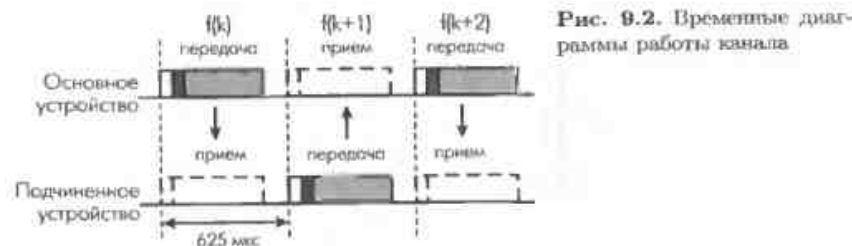


Рис. 9.2. Временные диаграммы работы канала

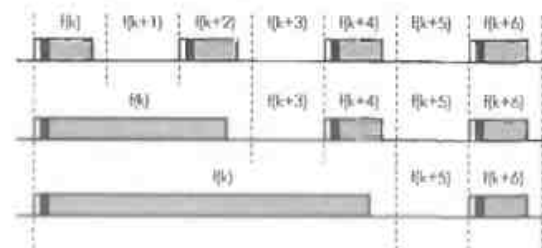
Протокол Bluetooth может поддерживать асинхронный канал данных, до трех синхронных (с постоянной скоростью) голосовых каналов или канал с одновременной асинхронной передачей данных

и синхронной передачей голоса. Скорость каждого голосового канала — 64 кбит/с в каждом направлении, асинхронного в асимметричном режиме — до 723,2 кбит/с в прямом и 57,6 кбит/с в обратном направлениях или до 433,9 кбит/с в каждом направлении в симметричном режиме.

Синхронное соединение (SCO) возможно только для логических соединений типа «точка-точка» (не путать с топологией сети!). Такой вид связи применяется для передачи информации, чувствительной к задержкам, например голоса. Основное устройство поддерживает до трех синхронных соединений, вспомогательное — до трех синхронных соединений с одним основным устройством или до двух — с разными основными устройствами.

При синхронном соединении основное устройство резервирует временные сегменты, следующие через так называемые SCO-интервалы. Даже если пакет принят с ошибкой, повторно при синхронном соединении он не передается.

Рис. 9.3. Передача пакетов различной длины



При асинхронной связи (ACL) используются временные сегменты, не зарезервированные для синхронного соединения. Асинхронное соединение возможно между основным и всеми активными подчиненными устройствами в пикосети. Основное и подчиненное устройства могут поддерживать только одно асинхронное соединение. Поскольку в пикосети может быть несколько подчиненных устройств, конкретное подчиненное устройство отправляет пакет основному, только если в предыдущем временном интервале на его адрес пришел пакет от основного устройства. Если в адресном поле ACL-пакета адрес не указан, пакет считается «широковещательным» — его могут читать все устройства. Асинхронное соединение позволяет повторно передавать пакеты, принятые с ошибками (механизм ARQ — automatic repeat request).

Каждому устройству Bluetooth изначально присваивается уникальный 48-разрядный физический адрес (Bluetooth-адрес). Он слу-

жит для идентификации и регистрации устройств в сети, а также при обращении к неактивным устройствам, однако при непосредственном обмене пакетами этот адрес не используется. Физический адрес подразделяется на три поля — младшие 24 разряда (нижняя адресная часть LAP), следующие 8 разрядов называют полем UAP (верхняя часть адреса). Старшие 16 бит физического адреса в сетях Bluetooth игнорируются и называются NAP — незначимая часть.

Стандартный пакет Bluetooth содержит код доступа длиной 72/68 бит, 54-разрядный заголовок и информационное поле длиной не более 2745 бит (рис. 9.4). Однако пакеты могут быть различных типов. Так, пакет может состоять только из кода доступа (в этом случае его длина равна 68 бит) или кода доступа и заголовка.

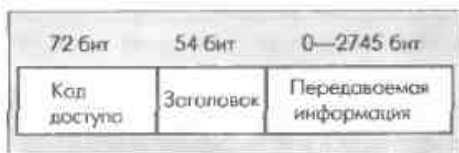


Рис. 9.4. Структура пакета Bluetooth

Код доступа идентифицирует пакеты, принадлежащие одной пикосети, а также используется для синхронизации и реализации процедуры запросов. Он включает преамбулу (4 бита), слово синхронизации (64 бита) и трейлер — 4 бита контрольной суммы (рис. 9.5). Слово синхронизации формируется на основе адреса устройства (его младшей части LAP). В состоянии соединения это адрес мастера сети, при регистрации и обращении к неактивным устройствам применяется их адреса.

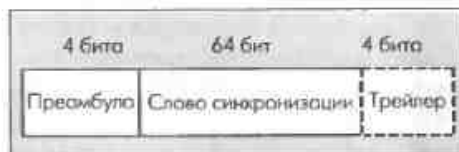


Рис. 9.5. Структура кода доступа

Слово синхронизации представляет собой кодированное блоковым кодом LAP-поле адреса устройства. Перед старшим битом LAP добавляется 6 бит — 001101 (если старший бит LAP равен 0) или 110010 так, что образуется 7-разрядная последовательность Баркера (улучшаются автокорреляционные свойства кода). После чего 30-битная последовательность скремблируется (перемножается по модулю 2

с псевдослучайной последовательностью), далее добавляются проверочные биты (34), так что получается кодовое слово (64, 30) (разновидность BCH-кодов [19]). Далее 64-разрядное кодовое слово еще раз скремблируется.

Заголовок содержит информацию для управления связью и состоит из шести полей (рис. 9.6):

- AM_ADDR — 3-разрядный адрес активного элемента (active member address);
- TYPE — 4-разрядный код типа данных;
- FLOW — 1 бит управления потоком данных, показывающий готовность устройства к приему;
- ARQN — 1 бит подтверждения правильного приема;
- SEQN — 1 бит, служащий для определения последовательности пакетов;
- HEC — 8-разрядная контрольная сумма.



Рис. 9.6. Структура заголовка

Информационное поле в зависимости от типа пакетов может содержать либо поля голоса, либо поля данных, либо оба типа полей одновременно.

Заголовок содержит 18 информационных бит, однако после сверточного кодирования со скоростью 1/3 они превращаются в 54 бита.

Как видно из структуры заголовка, в рамках пикосети одновременно могут взаимодействовать лишь восемь устройств, используя 3-разрядный адрес активного элемента AM_ADDR.

В сетях Bluetooth устройства могут находиться в трех основных состояниях — Standby (не подключено к сети), в состоянии подключения и парковки (park).

Состояние Standby означает, что устройство включено и готово к работе, но пребывает в режиме низкого энергопотребления. Из этого состояния оно может перейти в промежуточные состояния сканирования сообщений (пейджинг, запрос) или отправки пейджинговых либо поисковых сообщений. При сканировании сообщений

устройство ожидает адресованных ему запросов (page в терминологии Bluetooth). Запросы идентифицируются по коду доступа, сформированному на основе адреса запрашиваемого или запрашивающего устройства. Устройство ожидает такие сообщения в течение специального окна сканирования пейджинга длительностью 11,25 мс (по умолчанию). Пейджинговые сообщения передаются на 16 перестраиваемых частотах, причем скорость перестройки частот может быть вдвое выше, чем при информационном обмене, — 3200 скачков/с.

Пейджинговые сообщения рассылает мастер сети. Принявшее такое сообщение устройство отвечает специальным идентификационным пакетом. Если устройство может быть зарегистрировано в пикосети, мастер направляет специальный синхронизационный пакет, в ответ подчиненное устройство направляет подтверждение его приема. Весь этот обмен происходит посредством последовательности 16 частот. После чего считается, что соединение установлено и обмен ведется на стандартном для данной пикосети наборе 79 несущих. Отметим, что если в состоянии соединения ПСП перестройки частот определяется адресом мастера пикосети, то при начальной инициализации (пейджинге) набор из 16 частот определяется адресом подчиненного устройства.

Для поиска сетевого окружения (если нет активных устройств) используются похожие на пейджинг запросы в поисковом режиме. Принявшее такой запрос устройство отвечает специальным пакетом. Как правило, инициирует процедуру поиска будущий мастер пикосети.

Все вышесказанное относится к версии Bluetooth 1.1. Однако последовавшая за ней версия 1.2 привнесла ряд особенностей, среди которых основные — это:

- ускоренное установление соединения;
- адаптивная схема переключения частот (можно задавать число каналов от 79 до 20, между которыми происходит переключение);
- расширенные синхронные соединения (появляется режим расширения синхронных соединений eSCO, в котором за выделенным окном для синхронного соединения следует дополнительное окно для повторной передачи, если пакет принят неправильно);
- усовершенствованные алгоритмы обнаружения ошибок, контроля потоков и улучшенные схемы синхронизации.

Через год появилась последняя версия — Bluetooth 2.0 + EDR. Как и следует из названия, она состоит из двух частей, которые мо-

гут поддерживаться аппаратурой независимо, — это собственно обновленная версия спецификации 2.0 (не содержит принципиальных отличий от 1.2) и расширенный набор скоростей передачи данных EDR (Enhanced Data Rate).

Расширенный набор скоростей означает, что помимо базовой скорости 1 Мбит/с возможен обмен со скоростями 2 и 3 Мбит/с. Увеличение скорости передачи происходит за счет изменения методов модуляции. В базовой версии используется частотная модуляция с фильтром Гаусса (GFSK), в которой на один модуляционный символ приходится один бит. Скорость модуляции при этом равна скорости потока данных и составляет 1 Мсимвол/с. В режиме EDR применяется дифференциальная фазовая модуляция — 4- и 8-позиционные $\pi/4$ -DQPSK и 8-DPSK (рис. 9.7), в которых один модуляционный символ представляет два и три бита соответственно. Модуляция называется дифференциальной, поскольку изменение фазы происходит относительно предыдущего символа. В результате при той же скорости модуляции 1 Мбит/с скорость передачи данных составляет 2 и 3 Мбит/с. Режим EDR возможен не только при асинхронном соединении, но и в расширенном синхронном (eSCO).

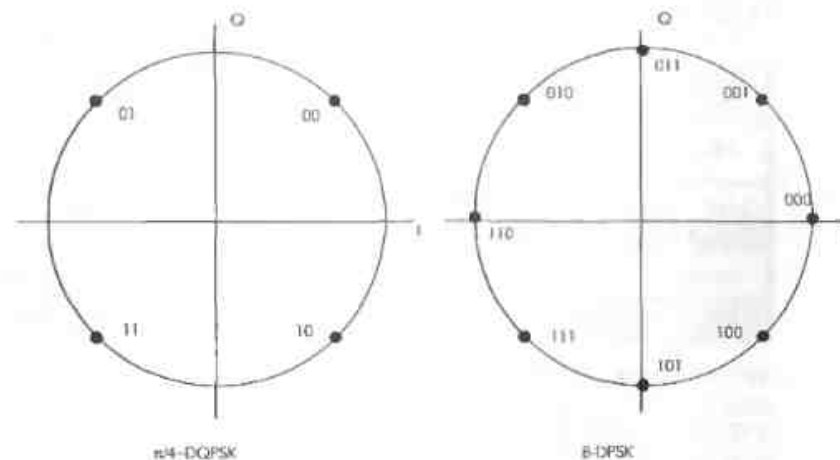


Рис. 9.7. Модуляционные символы в режиме EDR

Кроме того, в режиме EDR незначительно меняется структура пакета (рис. 9.8). Появляется защитный временной интервал (4,75–5,75 мкс), а также синхропоследовательность SYNC длиной 11 символов (11 мкс). Фазы DPSK-символов в этой последовательности попеременно меняются на $3/4\pi$ и $-3/4\pi$ (для четных и нечетных символов).

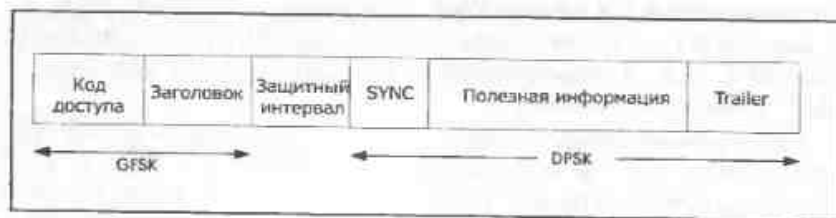


Рис. 9.8. Структура пакета в режиме EDR

Поскольку глобальная цель Bluetooth — всеобщее объединение, эта спецификация описывает протоколы работы практически на всех уровнях модели взаимодействия открытых систем (МВОС/OSI). Стек протоколов Bluetooth позволяет устройствам различных стандартов взаимодействовать друг с другом посредством данной технологии.

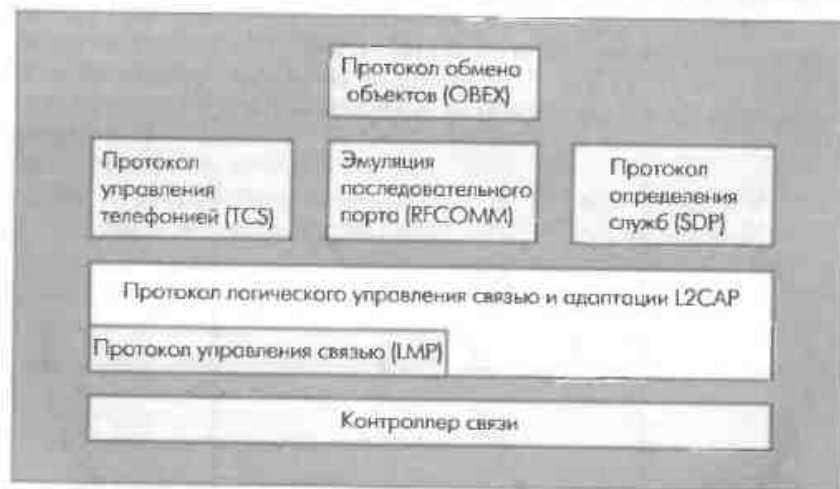


Рис. 9.9. Стек протоколов Bluetooth

До сих пор мы рассматривали только физический уровень и уровень звена данных, поскольку взаимодействие на этих уровнях поддерживается аппаратно. Протоколы верхних уровней, как правило, реализуются программно. Основные протоколы взаимодействия, входящие в Bluetooth (рис. 9.9):

- протокол управления соединением (Link manager protocol). Используется для установления связи, управления и защиты информации;

- протокол управления логическим соединением и адаптации (Logical link control and adaptation protocol L2CAP). Обеспечивает мультиплексирование, сегментацию и перекомпоновку пакетов;
- протокол определения служб (SDP). Позволяет идентифицировать тип и характеристики взаимодействующего устройства;
- протокол RFCOMM. Основан на стандарте ETSI TS 07.10, поддерживает интерфейс RS-232, обеспечивая эмуляцию последовательного порта;
- протокол управления телефонией (TCS). Служит для организации соединения между устройствами для передачи голоса и данных;
- протокол обмена объектами OBEX. Является основой для работы различных пользовательских приложений через канал Bluetooth (например, электронной почты). Он же обеспечивает совместное использование Bluetooth и других коммуникационных интерфейсов, например IrDA (Infrared Data Association).

9.1.4. Интегральная элементная база для Bluetooth

Одно из необходимых условий успеха такой технологии, как Bluetooth, — недорогая программно-аппаратная реализация. В структуру устройств Bluetooth (рис. 9.10) входит радиомодуль-трансивер, контроллер связи (baseband-процессор) и управляющее устройство, собственно реализующее протоколы Bluetooth верхних уровней, а также интерфейс с терминальным устройством. Причем если трансивер и контроллер связи (в первых чипсетах для Bluetooth) — это специализированные микросхемы (интегральные или гибридные), то устройство управления связью реализуют на стандартных микроконтроллерах, сигнальных процессорах либо его функции поддерживают центральные процессоры мощных терминальных устройств (например, ноутбуков). Кроме того, в устройствах Bluetooth применяют интегральные схемы (ИС), используемые в других приложениях, поскольку диапазон 2 МГц освоен достаточно хорошо, а заложенные в Bluetooth технические решения работы с радиотрактом сами по себе особой новизны не содержат (схема модуляции — широко распространена, технология расширения спектра методом FHSS хорошо отработана, мощность мала).

Поэтому неудивительно, что первые чипсеты для Bluetooth включали ИС, хорошо знакомые по другим приложениям. Так, одной из первых свое решение для Bluetooth представила фирма Philips

Semiconductors, предложив комплект ИС, включающий четыре микросхемы: синтезатор UMA1022, усилитель мощности SA2410, схему модуляции SA639 и трансивер SA2420. Две из них — UMA1022 и SA639 — используются в DECT-устройствах, да и остальные достаточно универсальны.

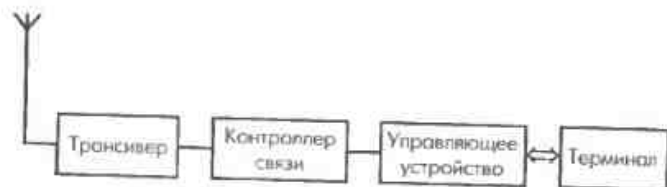


Рис. 9.10. Структура устройства Bluetooth

Однако вскоре Philips предложила специализированный чипсет, поддерживающий спецификацию Bluetooth 1.0. Он включает однокристалльный трансивер UAA3558, основанный на оригинальной технологии «низкой промежуточной частоты» (изначально создавался для DECT), и baseband-процессор серии VWS2600x. Процессор VWS26002 может работать и с трансивером компании Ericsson PBA 313. Он содержит ядро 32-разрядного RISC-микроконтроллера ARM7 TDMI, кодек голоса, поддерживает интерфейсы UART, USB, PCM и I²C. Изготавливается процессор по 0,25-мкм КМОП-технологии, поэтому он характеризуется малой потребляемой мощностью и низким напряжением: 1,8–2,5 В для цифрового ядра и 2,5–3,3 В для портов ввода/вывода. Одна из последних разработок компании Philips — полностью завершённый Bluetooth-радиомодуль DGB202, построенный на базе размещённых в одном корпусе коммуникационного Bluetooth-процессора PCF87852 и трансивера UAA3559. Вскоре должен стать доступным и перспективный baseband-процессор компании Philips — PCD 87550 (рис. 9.11, 9.12).

Вообще следует отметить, что ядро ARM TDMI применяется в baseband-процессорах многих фирм. Так, оно интегрировано в Bluetooth baseband-процессор фирмы Ericsson. На основе этого ядра построен и однокристалльный контроллер Bluetooth компании Atmel AT76C551. Его структура во многом аналогична приведенной на рис. 9.11. Atmel предлагает чипсет, включающий данный контроллер и однокристалльный трансивер T2901 компании Temic Semiconductors (которая теперь вошла в состав Atmel) (рис. 9.13). Трансивер T2901 обеспечивает радиус действия до 10 м. Если его надо увеличить до 100 м, Atmel предлагает SiGe-ИС T7024, включающую малошумящий предусилитель и усилитель мощности 23 дБм (рис. 9.14).

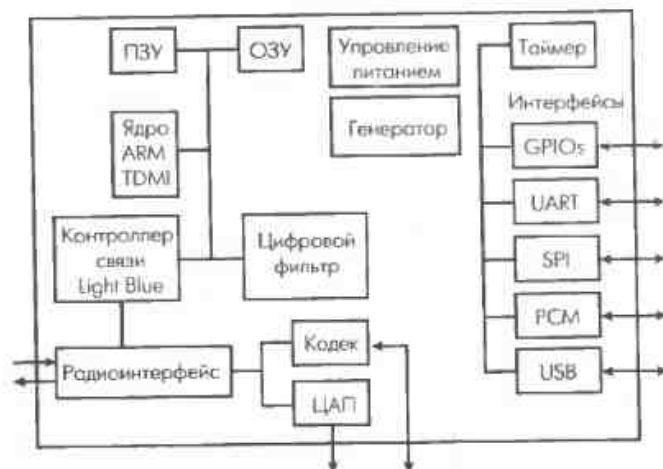


Рис. 9.11. Структурная схема Bluetooth-контроллера PCD 87550

В отличие от упомянутых выше монолитных ИС, трансивер компании Ericsson PBA31301 хотя и основан на специализированной BiCMOS ИС, но является гибридным модулем, собранным на многослойной керамической подложке (шесть слоев металлизации). В исполнении 100 Вт размеры модуля — 10,2 × 16 × 1,6 мм.



Рис. 9.12. Структура устройства Bluetooth с PCD 87550

Компания Lucent Technologies также производит чипсет для Bluetooth, содержащий однокристалльный передатчик W7020 с низкой потребляемой мощностью (напряжение питания — до 2,7 В), и baseband-контроллер W7400. Свой комплект ИС Odyssey выпустила и фирма Silicon Wave. В него входят ИС радиомодема SiW1501 и контроллер связи SiW1601.

Из наиболее современных на 2006 г. интегральных компонентов для Bluetooth отметим ИС PMB8753 компании Infineon — полно-

функциональное Bluetooth-устройство, поддерживающее спецификацию Bluetooth 2.0 + EDR (рис. 9.15). ИС содержит baseband-процессор и ВЧ-модуль, а также встроенный управляющий RISC-контроллер с ядром ARM 7, который может выполнять программы пользователей.

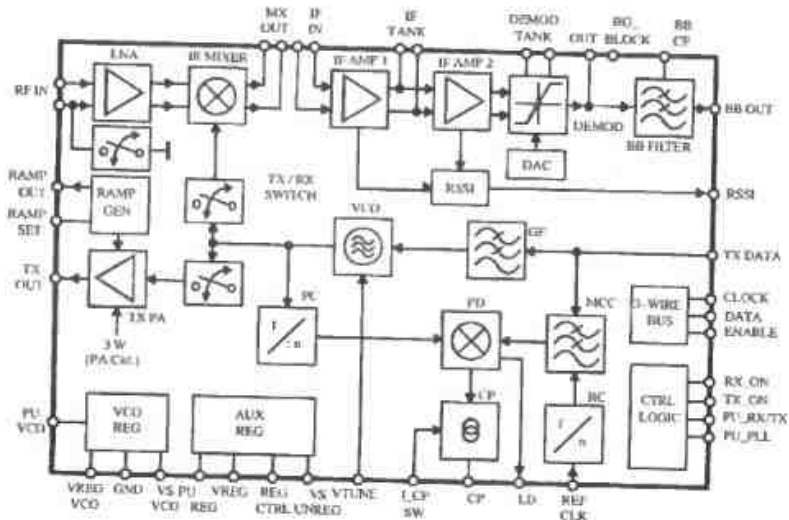


Рис. 9.13. Структура трансивера T2901

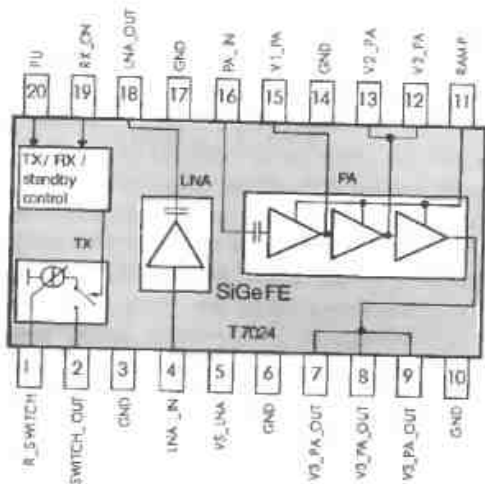


Рис. 9.14. Структура ИС T7024

Все говорит о том, что у беспроводной технологии Bluetooth большое будущее. Причина этого — в совокупности достоинств новой технологии, главные из которых:

- небольшой радиус действия, что означает малую мощность передатчика и низкую потребляемую мощность;
- высокая устойчивость к интермодуляционным помехам и отсутствие влияния устройств Bluetooth на обычную бытовую электронику;
- низкая стоимость.

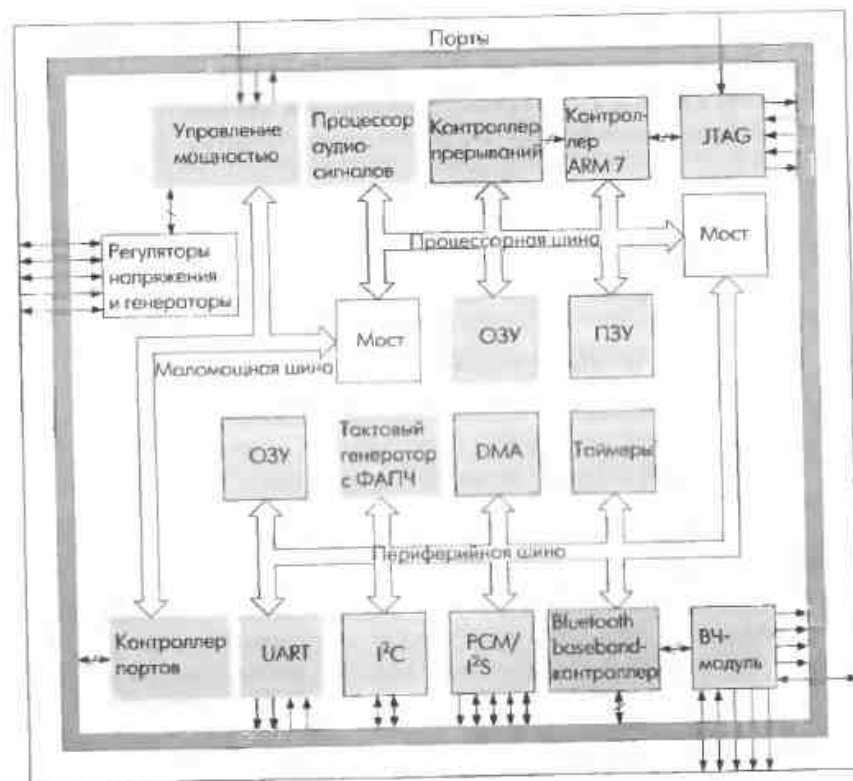


Рис. 9.15. Функциональная схема ИС PMB8753 компании Infineon

Однако, несмотря на всю свою привлекательность и универсальность, стандарт Bluetooth как основа построения именно сетей передачи информации используется сегодня относительно редко. Возможно, причина кроется в том, что все же это еще очень новая

технология, а также в том, что Bluetooth слишком универсален. В одних приложениях ему не хватает скорости обмена (например, при передаче видеосигнала), в других — требуются более простые и дешевые устройства.

Чтобы разрешить эти противоречия и окончательно стандартизовать принципы организации персональных СПИ, рабочая группа IEEE 802.15, не удовлетвовавшись стандартом IEEE 802.15.1, создала еще две исследовательские группы (Tg3 и Tg4). В результате в конце сентября 2003 г. были опубликованы два новых стандарта для высокоскоростной и низкоскоростной персональных БСПИ — IEEE 802.15.3 «Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)» и IEEE 802.15.4 «Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)» соответственно.

9.2. Высокоскоростные персональные сети стандарта IEEE 802.15.3

9.2.1. Спецификация IEEE 802.15.3

Стандарт IEEE 802.15.3 описывает работу малой БСПИ — пикосети (piconet). Пикосеть в стандарте IEEE 802.15.3 — это так называемая ad hoc-система, в которой несколько независимых устройств могут непосредственно взаимодействовать друг с другом. Радиус зоны действия одной пикосети, как правило, не превышает 10 м. Основные требования к ней — высокая скорость передачи данных, простая инфраструктура, легкость установления соединения и вхождения в сеть, наличие средств защиты данных и предоставление для определенных типов данных соединения с гарантированными параметрами передачи (гарантия качества обслуживания, QoS).

Пикосеть (рис. 9.16) может объединять несколько устройств, одно из которых выполняет функции управления (координатор пикосети — piconet coordinator PNC). Стандарт также предусматривает возможность формирования так называемых дочерних и пикосетей и описывает взаимодействие между независимыми соседними пикосетями. Каждое устройство должно обладать глобальным 64-разрядным MAC-адресом, однако для ускорения работы в сети ему присваивается и 8-разрядный сетевой адрес (идентификатор DEVID).

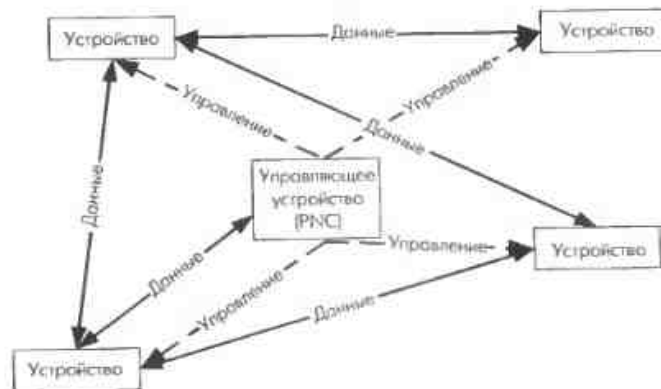


Рис. 9.16. Структура пикосети IEEE 802.15.3

В пикосети возможен обмен как асинхронными, так и изохронными (поточковыми) данными. К последним относится, например, звук и видео. Весь информационный обмен в пикосети основан на последовательности суперкадров (superframe — терминология стандартов IEEE 802.15). Каждый суперкадр (рис. 9.17) включает управляющий заголовок (пакет beacon), интервал конкурентного доступа (contention access period — CAP) и набор временных интервалов (каналов), назначенных определенным устройствам. PNC определяет границы всех интервалов и распределяет каналы между устройствами.

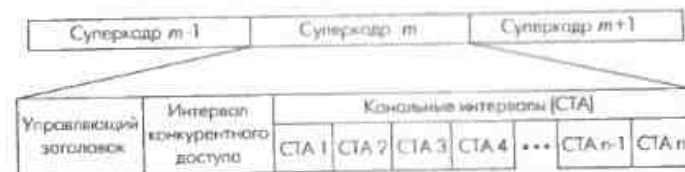


Рис. 9.17. Структура суперкадров физического уровня сети IEEE 802.15.3

Во время интервала конкурентного доступа к каналу работа станций регулируется на основе механизма контроля несущей с предотвращением коллизий — CSMA/CA (как и в стандарте IEEE 802.11, см. главу 10). Напомним его суть: ни одна станция не может начать работу до тех пор, пока не удостоверится, что в канале никто не работает на передачу. После этого станция выжидает случайный интервал τ , если канал по-прежнему свободен, начинает трансляцию (т. е. кто первый успел занять канал, тот и работает). В этот период передаются команды или асинхронные данные.

Капальные интервалы (СТА) координатор пикосети назначает каждому устройству или группе устройств по предварительному запросу с их стороны. В управляющем заголовке задается момент начала и длительность каждого СТА. Назначение капального интервала для какого-либо устройства означает, что никто другой в этот момент не может работать на передаче. СТА могут динамически распределяться в суперкадре (для асинхронных и изохронных данных) или быть фиксированными (только для изохронных данных). Также возможны управляющие СТА — специальные интервалы для передачи команд и служебных сообщений (МСТА). Причем во время специальных МСТА возможен конкурентный доступ к каналу для устройств, по какой-либо причине пропустившие управляющий заголовок текущего суперкадра.

Обмен данными в сети IEEE 802.15.3 происходит посредством пакетов (кадров). Пакеты MAC-уровня включают MAC-заголовок и поле полезных данных с проверочной последовательностью FCS (frame check sequence) (рис. 9.18). Максимальный размер поля полезных данных — до 2048 байт, включая FCS (от 0 до 4 байт). MAC-заголовок содержит поля, предназначенные для идентификации пикосети, устройства-источника и устройства-получателя пакета, потока и др. Поле управления фрагментацией используется, когда исходный пакет данных разбивается на части для передачи посредством нескольких кадров.

2 байта	2 байта	1 байт	1 байт	3 байта	1 байт	0–2048 байт	0–4 байта
Управление кадром	Идентификатор пикосети	Идентификатор приемника	Идентификатор источника	Управление фрагментацией	Индекс потока	Данные	Контрольная сумма FCS
MAC-заголовок						Поле полезных данных	

Рис. 9.18. Структура пакетов MAC-уровня сети IEEE 802.15.3

Поле управления кадром содержит полную информацию о передаваемом кадре, а именно версию протокола IEEE 802.15.3, признаки защищенных и повторно передаваемых кадров, а также признак того, что у передатчика нет данных, которые он должен передавать в отведенном ему интервале СТА. Кроме того, в поле управления кадром указывается вид и необходимость подтверждения приема (Acknowledge) — запрос подтверждения приема, а также тип кадра. Запрос подтверждения приема может отсутствовать, а также требовать немедленного подтверждения либо подтверждения с задержкой

(по дополнительному требованию передающего устройства). По типу кадры могут быть командными, кадрами данных, управления (Beacon) и подтверждения (немедленного и с задержкой).

Спецификация физического канала в документе IEEE 802.15.3 приведена только для диапазона 2400–2483,5 МГц. Она предусматривает пять допустимых скоростей передачи и соответственно пять типов квадратурной фазово-амплитудной модуляции — 4-позиционной (QPSK — quaternary phase-shift keying, дифференциальная QPSK (DQPSK), а также 16- 32- и 64-позиционные модуляции 16-QAM (quadrature amplitude modulation), 32-QAM и 64-QAM соответственно (табл. 9.3). Скорость 22 Мбит/с является базовой, ее обязаны поддерживать все устройства IEEE 802.15.3. При работе на этой скорости поддерживают все устройства IEEE 802.15.3. При работе на этой скорости формирования модуляционных символов кодируются посредством свертчного кодера с 3-разрядным сдвиговым регистром — так называемая модуляция посредством решетчатого кода (Trellis Code Modulation — TCM) с восемью состояниями. При этом в кодере к исходному набору из 1/3/4/5 бит (при QPSK/16-QAM/32-QAM/64-QAM) добавляется кодовый бит с выхода 3-разрядного сдвигового регистра.

Таблица 9.3. Модуляция и скорости передачи данных в сетях IEEE 802.15.3 в диапазоне 2,4 ГГц

Тип модуляции	Скорость передачи данных, Мбит/с
QPSK	11
DQPSK	22
16-QAM	33
32-QAM	44
64-QAM	55

На физическом уровне MAC-пакеты преобразуются в пакеты физического (PHY) уровня. К ним добавляется преамбула, заголовок физического уровня, вычисляется и добавляется общая для заголовков MAC- и физического уровней контрольная последовательность HCS (header check sequence), а также дополнительные биты (SB), выравнивающие общую длину MAC-поля данных так, чтобы она оказалась кратной числу информационных бит в символе (рис. 9.19). В самый конец пакета добавляются так называемые хвостовые символы TS (от двух до трех, в зависимости от вида модуляции), предназначенные для процедуры TCM-кодирования.

Все данные MAC-пакета (включая заголовок) и SB дополнительно скремблируются — перемешиваются по модулю 2 с псевдослучайной последовательностью, формируемой генератором с задающим полиномом $g(D) = 1 + D^{14} + D^{15}$. Этот генератор, представляющий

собой 15-разрядный сдвиговый регистр с обратными связями, инициализируется перед кодированием/декодированием каждого пакета вектором $X = [x_{14}, x_{13}, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$, где два старших бита передаются в заголовке физического уровня.



Рис. 9.19. Структура пакетов физического уровня сети IEEE 802.15.3 для скоростей 22, 33, 44 и 55 Мбит/с

Преамбула представляет собой специальную CAZAC-последовательность из 16 QPSK-символов (constant-amplitude, zero-autocorrelation – последовательность с постоянной амплитудой и ранней нулю автокорреляцией) [58]. Данная последовательность повторяется 12 раз, причем в 12-м повторе все символы смещаются по фазе на 180° .

Заголовок физического уровня длиной 16 бит включает два бита для вектора инициализации генератора скремблирующей последовательности, три бита для задания скорости передачи и 11-разрядное поле, в котором указана длина поля данных (в байтах).

Стандарт IEEE 802.15.3 требует, чтобы устройства могли работать в любом из пяти возможных частотных каналов (табл. 9.4). Причем предусматривается два кашальных плана – режим высокой плотности (четыре канала в допустимом диапазоне) и режим совместимости с сетью стандарта IEEE 802.11b (три разрешенных канала). Это означает, что каждое устройство перед началом работы сканирует диапазон, находит свободные каналы, определяет наличие работающей сети 802.11b.

Таблица 9.4. Распределение каналов в сетях IEEE 802.15.3

Номер канала	Центральная частота, МГц	Режим высокой плотности	Режим совместимости с IEEE 802.11b
1	2412	✓	✓
2	2428	✓	
3	2437		✓
4	2445	✓	
5	2462	✓	✓

9.2.2. Сверхбыстродействующие персональные сети — проект IEEE 802.15.3a

Спецификацию IEEE 802.15.3 не успели утвердить (а произошло это 12 июня 2003 г.), как весь телекоммуникационный мир стал ждать появления нового стандарта — IEEE 802.15.3a. Речь идет о разработке принципов построения шикосети со скоростью обмена 110–480 Мбит/с и выше — до 1320 Мбит/с. Достичь столь высоких скоростей можно, только увеличивая спектральную ширину канала, переходя в область так называемой сверхширокополосной связи (СШП, UWB). В США это стало возможным после 14 февраля 2002 г., когда Федеральная комиссия связи (FCC) США разрешила применение сверхширокополосных устройств внутри помещений в диапазоне 3100–10 600 МГц при максимальной плотности мощности излучения $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц ($-41,3$ дБм/МГц).

В результате в 2002 г. образовалась исследовательская группа Tg3a, в которую вошли представители практически всех крупнейших полупроводниковых и телекоммуникационных фирм. Вскоре появились два конкурирующих предложения по технологии СШП-передачи — на основе ортогональных кодов (так называемый мультиполосный множественный доступ посредством ортогональных несущих, MB-OFDM) и путем расширения спектра сигнала методом прямой последовательности (DS-UWB). Первое предложение поддерживало большинство фирм во главе с гигантами Texas Instruments и Intel (в марте 2003 г. было создано даже специальное объединение MBOA — Multiband OFDM Alliance). Лидеры сторонников второго (UWB Forum) возглавили компании Motorola и XtremeSpectrum. По принятым в комитете IEEE 802 правилам, для того чтобы утвердить стандарт, за предложенный вариант должны проголосовать не менее 75% членом рабочей группы. Однако, несмотря на численный перевес сторонников MB-OFDM, на прошедших голосованиях им не удалось набрать необходимые 75% голосов от общего числа компаний, работающих над стандартом IEEE 802.15.3a. А ведь в MBOA входит 170 компаний, среди которых — 9 из 10 крупнейших полупроводниковых компаний (кроме TSMC). К осени 2005 г. ситуация окончательно зашла в тупик, и в январе 2006 г. группа Tg3a самораспустилась. Это, однако, означает лишь некий перерыв (от полугода до года), а не прекращение работ в данном направлении.

Более того, распад группы по стандартизации вовсе не означает прекращение работ в рамках альянсов MBOA и UWB Forum. Про-

изготовители СБИС готовы начать выпуск необходимых компонентов (а некоторые уже начали), и ситуация должна вскоре разрешиться. Тем более что уже появляются предложения, как объединить две эти технологии и без особых затрат производить двухмодовые устройства, поддерживающие и MB-OFDM, и DS-UWB. Поэтому рассмотрим альтернативные варианты проекта IEEE 802.15.3a как основу будущего высокоскоростного стандарта персональных БСПИ.

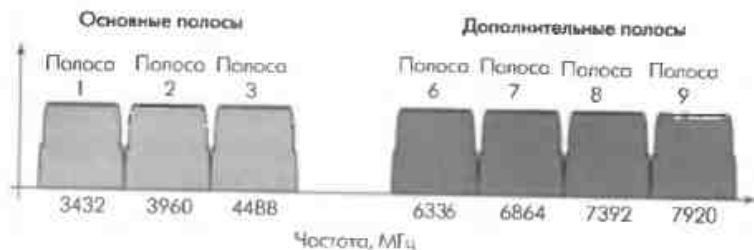


Рис. 9.20. Предлагаемое распределение каналов в стандарте IEEE 802.3a в США

9.2.3. Технология MB-OFDM

Суть технологии MB-OFDM состоит в том, что весь разрешенный диапазон делится на полосы шириной 528 МГц. В стандартном режиме предусмотрено три полосы, в расширенном — семь (рис. 9.20). Каждая полоса, в свою очередь, делится на 128 поднесущих частот с шагом 4,125 МГц. Из них используется 122: 100 — для модуляции данных, 12 поднесущих — пилотные и еще 10 — защитные. Каждая поднесущая модулируется посредством QPSK. Один OFDM-символ содержит 100 или 200 кодированных бит (100 в случае, когда одинаково модулируются две поднесущие, симметричные относительно центральной). Период следования символов — 312,5 нс. До сих пор все соответствует обычной OFDM. Мультиполосность означает, что последующий символ может передаваться в иной частотной полосе по жестко определенной схеме для каждого логического канала.

Последовательность перехода с одной полосы частот на другую называют частотно-временным кодом. Пока предусмотрено четыре таких кода (канала) (табл. 9.5). Кроме перехода с частоты на частоту, предусмотрен режим, когда один символ может передаваться несколько раз (два или четыре). Например, код $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2$ означает, что первый OFDM-символ передается в полосах 1 и 2, второй — в полосах 3 и 1, третий — в полосах 2 и 3.

Таблица 9.5. Частотно-временные коды

Номер логического канала	Режим трех полос	Режим семи полос
1	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$	$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$
2	$1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$	$1 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$
3	$1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 3$	$1 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 2 \rightarrow 5$
4	$1 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 2$	$1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$

Обмен информацией происходит кадрами (пакетами). Кадр состоит из преамбулы (набора синхронизирующих последовательностей), заголовка (управляющая информация) и поля данных. Преамбула и заголовок всегда транслируются с наименьшей из возможных скоростей — 55 Мбит/с. Четыре логических канала подразумевают, что в непосредственной близости могут работать по крайней мере четыре шикосети. Для этого каждому логическому каналу соответствует уникальный вид синхропоследовательности в преамбуле.

Таким образом, предлагается комбинация OFDM и известного механизма частотных скачков (FH). В результате в зависимости от скорости кодирования и числа повторов символов и формируется спектр скоростей от 55 до 480 Мбит/с. Изменяя вид модуляции, можно достичь и больших скоростей. Так, применение 16-QAM при той же схеме кодирования даст уже $480 \times 2 = 960$ кбит/с. Другой путь заключается в использовании для передачи одновременно трех диапазонов — тогда при QPSK и скорости сверточного кодирования 3/4 (на три исходных бита приходится четыре кодированных) достигается скорость $480 \times 3 = 1440$ Мбит/с.

Проблема в том, что метод частотных скачков не самый эффективный с точки зрения использования спектрального диапазона. Опоненты MB-OFDM указывают, что сторонники данной технологии в своих измерениях средней мощности излучения передатчика усредняют ее по временному интервалу порядка 1 мс. Это время соответствует длительности трех символов. Реально же при использовании механизма повторов (и при измерениях) символ в одном субканале за это время передается только один раз. В результате плотность мощности излучения при работе передатчика может превосходить допустимые (Федеральной комиссией связи США) — 41,3 дБм/МГц. А это уже серьезная проблема, поскольку речь идет о сигнале с полосой выше 500 МГц.

9.2.4. Технология DS-UWB

Сторонники технологии DS-UWB предлагают для расширения спектра классический метод прямой последовательности. При этом каждый бит заменяется специальной кодовой последовательностью длиной до 24 бит. Предусмотрено два вида модуляции — двоичная фазовая BPSK (один бит на символ) и так называемая 4BOK-модуляция (модуляция на основе четырех ортогональных двоичных кодов). 4BOK — фактически вариант квадратурной модуляции, один 4BOK-символ содержит 2 бита.

Весь диапазон вещания разбит на две зоны: 3,1–4,85 ГГц (нижний диапазон) и от 6,9 до 9,7 ГГц (верхний диапазон). В каждом диапазоне предусмотрено по шесть каналов пикосети (с шагом 39 МГц в нижнем диапазоне, начиная с 3900 МГц, и с шагом 78 МГц — в верхнем, начиная с 7800 ГГц). Только четыре канала нижнего диапазона с центральными частотами 3939, 3978, 4017 и 4056 МГц считаются обязательными для поддержки каждым устройством, остальные каналы — дополнительные. Частота следования модуляционных символов в каждом канале равна 1/3 его центральной частоты. В зависимости от скорости предварительного кодирования, вида модуляции и длины кодовой последовательности скорость передачи данных может составить 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000 и 1320 Мбит/с.

Недавно появились первые чипсеты стандарта IEEE 802.15.3. Так, Freescale Semiconductor, дочерняя компания фирмы Motorola, выпустила чипсет XS110 из трех микросхем — трансивера с ВЧ-трактом, baseband-процессора (коммуникационный процессор, выполняющий все преобразования физического уровня, включая ЦАП/АЦП) и MAC-контроллера. Максимальная скорость, обеспечиваемая модемом на основе этого чипсета, — 114 Мбит/с (т. е. речь идет о версии стандарта на основе технологии DS-UWB). Энергия, потребляемая чипсетом, — 750 мВт, напряжение питания — 3,3 В. Общая мощность излучения в полосе частот 3,1–10,6 ГГц — менее 1 мВт. Микросхемы изготовлены на основе 0,18-мкм КМОП- и SiGe-технологии.

9.3. Низкоскоростные сети стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee)

Мир испытывает потребность не только в сетях с высочайшими скоростями передачи данных. Для очень широкого спектра задач достаточно низкой скорости обмена — лишь бы сетевые устройства были максимально простыми, дешевыми, со сверхнизким потреблением

энергии и простым механизмом подключения к сети. Скажем, для интерактивных игр не нужна скорость обмена с компьютером выше 250 кбит/с, а разнообразные задачи автоматизации и системы сбора информации и вовсе не требуют скоростей передачи выше 20 кбит/с.

Для решения данного круга задач и был разработан стандарт низкоскоростных БСПИ IEEE 802.15.4. Его разработчиком выступил альянс компаний (Invensys, Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Philips), назвавший себя ZigBee — (от Zig-zag — зигзаг и Bee — пчела). Подразумевалось, что топология сети будет напоминать зигзагообразную траекторию полета пчелы от цветка к цветку. Под таким замысловатым названием технология ZigBee и получает все большее распространение.

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) предусматривает работу в трех диапазонах: один канал 868,0–868,6 МГц (для Европы), 10 каналов в диапазоне 902–928 МГц (шаг центральных частот 2 МГц, самая нижняя из них — 906 МГц) и 16 каналов в диапазоне 2400–2483,5 МГц (шаг центральных частот 5 МГц, самая нижняя из них — 2405 МГц) (табл. 9.6).

Таблица 9.6. Частотные диапазоны и скорости передачи в сетях IEEE 802.15.4

Частотный диапазон, МГц	Числовая скорость, Кбит/с	Модуляция	Битовая скорость, кбит/с	Скорость символов, Ксимволов/с
868–868,6	300	BPSK	20	20
902–928	600	BPSK	40	40
2400–2483,5	2000	O-QPSK	250	62,5

В радиоканале использован метод широкополосной передачи с расширением спектра прямой последовательностью (DSSS). Модуляция и расширенияющие последовательности для диапазонов 868/915 и 2450 МГц различны.

В диапазоне 2450 МГц поток немодулированных данных разбивается на группы по четыре бита. Каждая группа заменяется одной из 16 квазиортогональных последовательностей длиной 32 бит (чипа). Последовательности приведены в стандарте. Модуляция данных — квадратурная фазовая (QPSK). Четные чипы квазиортогональной последовательности (начиная с нулевого) модулируют синфазный (I) канал, нечетные — квадратурный (Q) канал. В результате последовательность в квадратурном канале смещена относительно синфазного на период одного чипа, поэтому модуляция называется Offset-QPSK

(QPSK со сдвигом). Длительность импульса после квадратурного модулятора вдвое больше, чем длительность одного чипа (форма импульса — половина периода синусоиды с частотой, вдвое меньшей частоты чипов).

В диапазоне 868/915 МГц поток данных подвергается дифференциальному кодированию по схеме $E_i = E_{i-1} \oplus R_i$, $E_0 = 0$. Здесь R_i и E_i — биты до и после кодирования соответственно. Далее происходит замена каждого бита расширяющей последовательностью длиной 15 бит («1» заменяется на 0537_{16} , «0» — на инверсную последовательность $7AC8_{16}$). Далее преобразованный поток данных передается в радиоканал посредством двухпозиционной фазовой модуляции (BPSK). Форма импульса при этом соответствует так называемому приподнятому косинусу, в данном случае — функции вида $[\sin(x)]/[x(1-x^2)]$, где $x = 2\pi f_{\text{чипов}}t$, $t = 0 \dots 1/f_{\text{чипов}}$.

Сеть стандарта IEEE 802.15.4 содержит два типа устройств — так называемые полнофункциональные (FFD) и устройства с уменьшенной функциональностью (RFD). Их основное отличие: FFD могут устанавливать соединения с любыми устройствами, RFD — только с FFD. В каждой шикосети (PAN) должно быть устройство — координатор PAN. Его функции может выполнять только FFD.

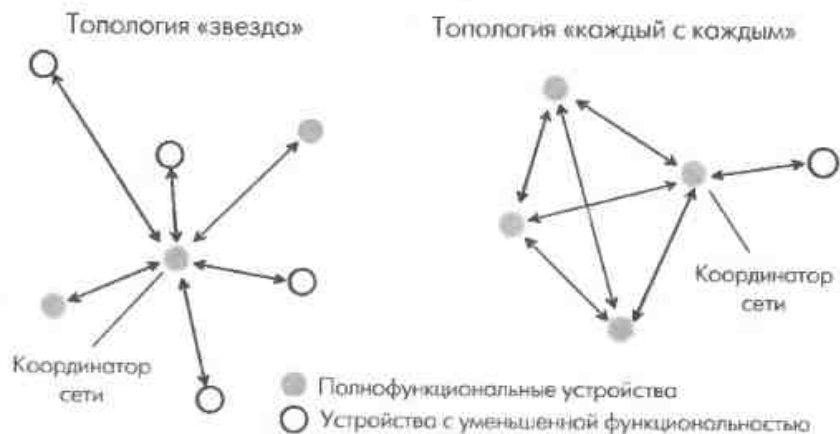


Рис. 9.21. Топология сети IEEE 802.15.4 типа «звезда» и «равный с равным»

Сеть, состоящая из одного FFD и нескольких RFD, образует топологию типа «звезда». Если в сети FFD несколько, топология может быть более сложной — типа одноранговой сети (сети равноправных устройств, peer-to-peer) «каждый с каждым» (рис. 9.21) или объеди-

нение нескольких звездообразных кластеров (рис. 9.22). Но в любом случае одно из FFD выполняет функцию координатора сети. Каждому устройству сети присваивается 64-разрядный адрес. Отметим, что стандарт предусматривает взаимодействие устройств не только в рамках одной PAN, но и между различными соседними PAN (для чего и нужна развитая система адресации). Для упрощения обмена внутри сети координатор PAN может присвоить устройствам более короткие 16-разрядные адреса. В этом случае для межсетевых взаимодействий используются 16-разрядные идентификаторы сетей, также назначаемые координатором.

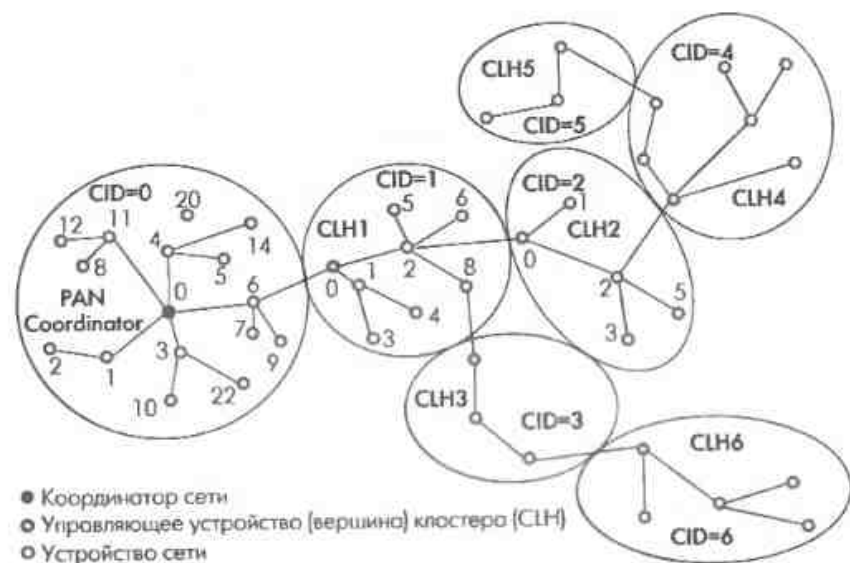


Рис. 9.22. Объединение нескольких кластеров в сети IEEE 802.15.4

Информационный обмен в шикосети происходит посредством последовательности суперфреймов. В общем случае суперфрейм включает управляющий интервал (beacon), за ним следует интервал конкурентного доступа (CAP) в соответствии с механизмом CSMA/CA и период назначенного доступа. Последний содержит набор временных интервалов, назначенных определенным устройствам, чувствительным к задержкам, для передачи данных (гарантированные тайм-слоты, GTS), например для связи беспроводного манипулятора «мышь» с компьютером. Управляющий интервал передает только координатор PAN. Отметим, что в суперфрейме может не быть ни управ-

ляющего интервала, ни GTS. В общем, структура суперфреймов аналогична принятой в стандарте IEEE 802.15.3 (см. рис. 9.17).

Каждое устройство передает информацию посредством фреймов (пакетов). Они могут быть четырех типов – управляющие (beacon frame), фреймы данных, фреймы подтверждения приема данных и фреймы команд MAC-уровня. Фреймы физического уровня (рис. 9.23) содержат заголовок с синхронпоследовательностью и информацией о размере фрейма (до 127 байт) и собственно поле данных – пакет MAC-уровня. Последний содержит заголовок со всей необходимой информацией о фрейме (тип, наличие криптозащиты, необходимость подтверждения приема и т.п.), адреса и идентификаторы устройства – отправителя и получателя, собственно поле данных и проверочную контрольную сумму (рис. 9.24). Сама процедура обмена информацией может использовать пакеты подтверждения приема данных (если потеря пакета критична).

Заголовок синхронизации		Заголовок физического уровня		Поле данных
Преамбула	Маркер начала фрейма	Длина фрейма	Зарезервировано	
4 байта	1 байт	7 бит	1 бит	Произвольно

Рис. 9.23. Структура пакетов физического уровня стандарта IEEE 802.15.4

Для IEEE 802.15.4 (ZigBee) чипсеты производит уже достаточно широкий ряд производителей. Характерен продукт компании Freescale Semiconductor – однокристалльный модем MC13192 для диапазона 2,4 ГГц (рис. 9.25). Это законченное решение беспроводного модема. Устройство содержит интерфейс с микроконтроллером и может применяться во множестве задач.

Заголовок MAC-уровня						Поле данных	Проверочная последовательность
Контроль кодра	Номер последовательности	Идентификатор сети назначения	Идентификатор устройства назначения	Идентификатор сети источника	Адрес источника		
		Адресные поля					
2 байта	1 байт	0 / 2 байта	0 / 2 / 8 байт	0 / 2 байта	0 / 2 / 8 байт		

Рис. 9.24. Структура пакетов MAC-уровня стандарта IEEE 802.15.4

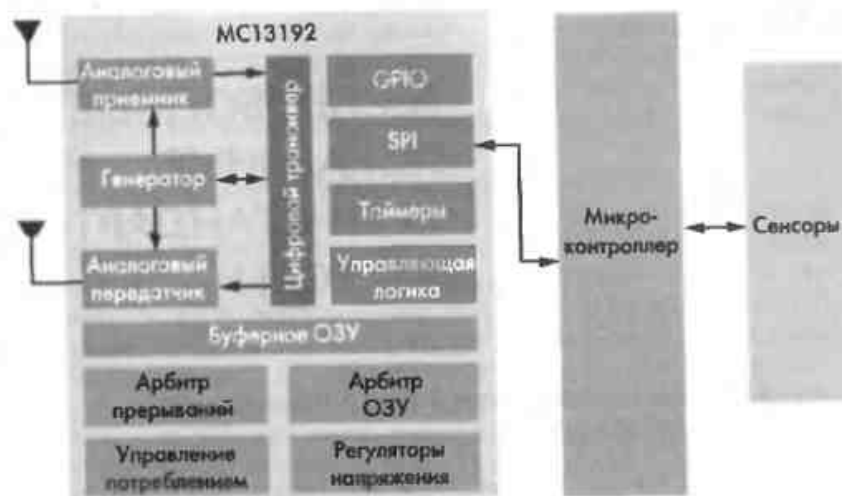


Рис. 9.25. Однокристалльный модем MC 13192 компании Freescale Semiconductor

ГЛАВА 10

БЕСПРОВОДНЫЕ ЛОКАЛЬНЫЕ СЕТИ СТАНДАРТОВ IEEE 802.11

10.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11

22 мая 1973 г. Роберт Меткалф, сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто, подал своему руководству докладную записку, в которой впервые ввел слово «ethernet» и изложил основные принципы работы новой локальной компьютерной сети, воплощенные позднее в стандарте IEEE 802.3, именуемом сегодня Ethernet'ом. Интересно, выбирая название для новой технологии, автор сознательно остановился на словосочетании ether net — «эфирная сеть», предвидя, что через четверть века Ethernet устремится в эфир?

Беспроводные локальные сети передачи информации (WLAN) развиваются в последние пятнадцать лет невероятно быстро. Простота развертывания таких сетей ограничена только необходимостью оформления разрешительной документации (в тех странах, где это требуется). По пропускной способности они не уступают выделенным медным линиям. Помехоустойчивость, надежность и защищенность современных протоколов передачи сделали WLAN явлением повсеместным, а оборудование для них — массовым продуктом. Отметим, что понятие «локальные сети передачи информации» достаточно условно. Как правило, имеются в виду системы, локализованные в радиусе сотни метров. Однако технологии локальных сетей с успехом применяют и на расстояниях до нескольких десятков километров.

Рынок массовых устройств WLAN достаточно молод. Первые устройства для беспроводных локальных сетей появились в начале-середине 90-х годов. Но уже в 1999-м объем продаж оборудования WLAN достиг 600–770 млн долларов, а к 2004 г. он составил порядка 2,2–3 млрд долларов. Ежемесячно в мире продается около миллиона адаптеров только стандарта IEEE 802.11b. По экспертным оценкам, к

2003 г. их было установлено свыше 20 млн. Причем стремительно развиваются сами технологии передачи и оборудование для них — скорости выросли от 1–2 до 54 Мбит/с, затем перешагнули и барьер в 100 Мбит/с. С неменьшей стремительностью падает и стоимость оборудования, составляя уже десятки долларов для конечных пользовательских устройств.

Работы над единым стандартом локальных БСПИ начались в 1989 г., когда была организована рабочая группа 11-го комитета IEEE 802. В июле 1997 г. в результате работы этой группы был опубликован стандарт IEEE 802.11 «Спецификация физического уровня и уровня контроля доступа к каналу передачи беспроводных локальных сетей» («Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications»). Он определял архитектуру сети и вытекающие из этого требования к функциям устройств, принципы доступа устройств к каналам связи, формат пакетов передачи, способы аутентификации и защиты данных. Хотя стандарт изначально задумывался как инвариантный по отношению к какому-либо частотному диапазону, на физическом уровне он определял три способа работы: два радиочастотных и оптический. В инфракрасном диапазоне предусматривалась импульсно-позиционная модуляция, в диапазоне 2,400–2,4835 ГГц — режимы модуляции с расширением спектра методом частотных скачков (FHSS) и методом прямой последовательности (DSSS). Скорости обмена устанавливались на уровне 1 и 2 Мбит/с.

Отметим, что устройства, соответствующие исходной спецификации IEEE 802.11, не успели получить развития. Пропускная способность проводных сетей Ethernet сильно возросла, и максимальная скорость передачи 2 Мбит/с, предусмотренная в IEEE 802.11, не удовлетворяла пользователей. Проблему решил появление стандартов (дополнений) IEEE 802.11b, 802.11a и 802.11g.

Первым стал утвержденный 16 сентября 1999 г. стандарт IEEE 802.11b. Он описывал физический и MAC-уровни беспроводных сетей для работы в диапазоне 2,4 ГГц. Стандарт определял работу на скоростях 1 и 2 Мбит/с с модуляцией только методом DSSS. Самое же главное — он предусматривал скорости обмена до 11 Мбит/с (а опционально — и до 33 Мбит/с). Передача данных на скоростях 5,5 и 11 Мбит/с происходит посредством модуляции комбинированных кодовых последовательностей ССК (основной вид модуляции). Кроме того, предусматривалась и работа на скоростях 22 и 33 Мбит/с посредством пакетного бинарного сверточного кодирования (PBCC).

Стандарт IEEE 802.11a, описывающий работу в диапазоне 5 ГГц, был принят одновременно с IEEE 802.11b. В нем использован прин-

циально иной, чем в IEEE 802.11b, механизм модуляции/мультиплексирования, а именно частотное мультиплексирование посредством ортогональных несущих (OFDM). Данный метод, в частности, достаточно хорошо зарекомендовал себя в системах цифрового телевизионного вещания DVB. В конце 1999 г. были закончены основные работы по созданию европейского 5-ГГц стандарта беспроводных сетей HiperLan2 (HiperLan type 2), который так и не получил массового развития. В июне 2003 г. был утвержден высокоскоростной (до 54 Мбит/с) стандарт в диапазоне 2,4 ГГц — IEEE 802.11g.

Сегодня близок к завершению стандарт IEEE 802.11n, описывающий сети со скоростью обмена свыше 100 Мбит/с на основе технологии антенных систем MIMO. Разрабатывается мобильная версия стандарта (IEEE 802.11p) и дополнение, предназначенное для предоставления гарантированного качества связи (QoS), — IEEE 802.11e.

10.2. Основные принципы IEEE 802.11

Рассмотрим подробнее, что представляет собой стандарт IEEE 802.11 [70] как базовый для всех последующих спецификаций. Как и все стандарты комитета IEEE 802, в документе IEEE 802.11 рассматриваются два нижних уровня модели взаимодействия открытых систем (OSI): физический и канальный (Data Link layer). Причем последний подразделяется на два подуровня. Верхний — Logical Link Control (LLC) — описан в стандарте IEEE 802.2. Стандарт IEEE 802.11 рассматривает только нижний подуровень — Medium Access Control (MAC), т. е. управление доступом к каналу (к среде передачи). Иными словами, на физическом уровне стандарт определяет способ работы со средой передачи, скорость и методы модуляции. На MAC-уровне — принцип, по которому устройства используют (делят) общий канал, способы подключения устройств к точкам доступа и их аутентификации, механизмы защиты данных. Поскольку стандарт IEEE 802.11 разрабатывался как «беспроводной Ethernet», он предусматривает пакетную передачу с 48-битными адресами пакетов, как и любая сеть Ethernet. Комитет IEEE 802 особое внимание уделял совместимости всех своих стандартов, в результате проводные и беспроводные сети IEEE 802 легко сопрягаются друг с другом.

Когда речь заходит о радиотракте, ключевой вопрос — частотный диапазон. IEEE 802.11 привязан к существующим в США и ряде других стран безлицензионным частотным диапазонам. Изначально он был ориентирован на диапазон 2,400–2,4835 ГГц с шириной полосы

83,5 МГц. Определяемая стандартом спектральная маска для одного канала приведена на рис. 10.1 (мощность отсчитывается относительно пиков функции $\sin(x)/x$). Ширина канала по уровню -30 дБ составляет 22 МГц, следовательно, в полосе 83,5 МГц возможно три неперекрывающихся канала.

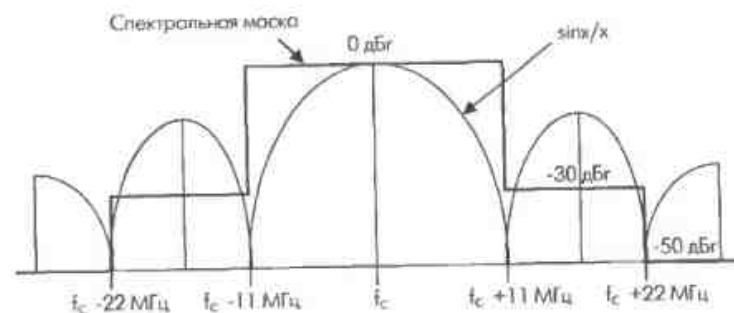


Рис. 10.1. Спектральная маска канала сети 802.11 при модуляции методом DSSS

Стандарт предусматривает два основных способа организации локальной сети: по принципу «равный с равным» (ad-hoc-сеть — рис. 10.2, а) и в виде структурированной сети (рис. 10.2, б).

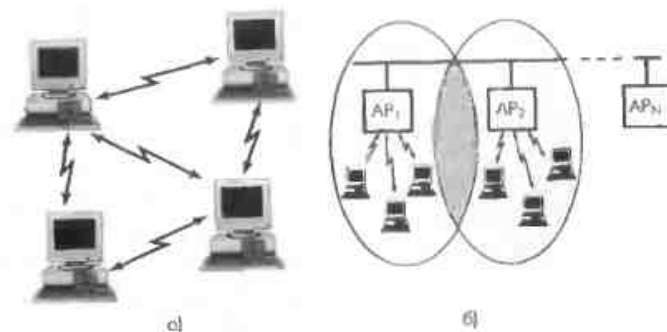


Рис. 10.2. Архитектура сети 802.11: а — ad-hoc-сеть; б — структурированные сети

В первом случае связь устанавливается непосредственно между двумя станциями, и никакого администрирования не предусмотрено. В случае структурированных сетей (а как показала практика, это основной способ построения сетей IEEE 802.11) в их составе появляется дополнительное устройство — точка доступа (AP — Access Point), как правило, стационарная и действующая на фиксирован-

ном канале. Связь между устройствами происходит только через AP. Через них же возможен выход во внешние проводные сети. В сети IEEE 802.11 может быть несколько AP, объединенных проводной сетью Ethernet. Фактически такая сеть представляет собой набор базовых станций с перекрывающимися зонами охвата. Стандарт IEEE 802.11 допускает перемещения устройств из зоны одной AP в зону другой (роуминг), тем самым обеспечивая мобильность. Поскольку для мобильных станций важен ресурс элементов питания, в стандарте заложен специальный протокол управления энергопотреблением — непосредственно при обмене передающее устройство может перевести приемник в режим ожидания.

Важнейшее требование к стандартам беспроводной связи — безопасность передачи данных. В связи с этим на MAC-уровне предусмотрен механизм защиты данных, включающий аутентификацию станций и собственно шифрование передаваемых данных. Этот механизм должен обеспечивать такой же уровень защиты, как и в обычных сетях Ethernet, поэтому его назвали WEP (Wired Equivalent Privacy — эквивалент проводной конфиденциальности). Алгоритм WEP основан на использовании четырех общих для одной сети секретных ключей длиной 40 бит. Само шифрование происходит по алгоритму RC4 компании RSA Security. Алгоритм использует перемножение блоков исходных данных на псевдослучайную последовательность такой же длины, что и блок шифруемых данных. Генератор псевдослучайной последовательности инициализируется 64-разрядным числом, состоящим из 24-разрядного вектора инициализации (IV — initialization vector) и 40-разрядного секретного ключа. Существенно, что если секретный ключ известен устройствам сети и неизменен, то вектор IV может изменяться от пакета к пакету. Для защиты от несанкционированного изменения передаваемой информации каждый шифрованный пакет защищается 32-разрядной контрольной суммой (ICV — integrity check value). Таким образом, при шифровании к передаваемым данным добавляется 8 байт: 4 для ICV, 3 для IV, и еще 1 байт содержит информацию о номере используемого секретного ключа (одного из четырех). Отметим, что секретный ключ может быть гораздо длиннее — 64, 128 бит и т.д. Это не противоречит стандарту, более того, такое оборудование выпускается, однако законодательство США препятствует экспорту устройств, поддерживающих шифрование данных с ключом длиннее 40 бит. Именно поэтому производители ограничиваются 240 вариантами ключа. Дополнительные методы защиты информации и аутентификации в сетях 802.11 описаны в стандарте IEEE 802.11i (опубликован в 2004 г.).

Как мы уже отмечали, устройства, соответствующие исходной спецификации IEEE 802.11, практически не получили развития. Поэтому далее, без умаления общности, будем рассматривать IEEE 802.11 с точки зрения спецификации IEEE 802.11b, как первой, активно поддерживаемой производителями аппаратуры.

10.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11

Стандарт IEEE 802.11 предусматривает два режима управления сетью: когда функции управления распределены между всеми устройствами сети IEEE 802.11 — так называемый режим DCF (Distributed coordination function) — и когда они сосредоточены в одной определенной точке доступа — режим PCF (Point coordination function). В режиме DCF все устройства работают по принципу конкурентного доступа к каналу передачи, т.е. приоритетов не существует. Необходимость в режиме централизованного управления PCF возникает при передаче чувствительной к задержкам информации (например, видеопотоков), когда необходимо вводить приоритеты доступа.

Работа в режиме PCF может происходить только под управлением специальной точки доступа, называемой точкой координации (PC), и только в определенные, периодически повторяющиеся интервалы. Когда сеть переходит в режим PCF, в трафике появляются интервалы, в которых конкурентный доступ отменен, и весь обмен происходит под управлением координирующего устройства (PC) (рис. 10.3). По завершении такого интервала сеть возвращается в режим DCF. Интервалы под управлением PC следуют через строго определенный период, в начале каждого интервала PC высылает особый сигнальный кадр (Beacon). PC не может передать очередной сигнальный кадр до тех пор, пока канал не освободится, т.е. очередной «свободный от конкуренции» интервал может начинаться с задержкой.

Режим PCF важен для передачи регулярно повторяющейся чувствительной к задержкам информации. Он также эффективен, если сети IEEE 802.11 используются в качестве среды доступа к Интернету (или иным глобальным сетям), т.е. обеспечивают обмен данными между пользователями и централизованным провайдером [7]. Однако основной принцип сетей Ethernet — это все же произвольный конкурентный доступ, что и делает последние столь простыми в реализации и эксплуатации. В проводных сетях Ethernet используется механизм множественного доступа к каналу связи с контролем несущей и обнаружением конфликтов (CSMA/CD — Carrier Sense

Multiple Accesses with Collision Detection). Станция может начать передачу, только если канал свободен. Если станции обнаруживают, что на одном канале пытаются работать несколько станций, все они прекращают передачу и пытаются возобновить ее через случайный промежуток времени. Таким образом, даже при передаче устройство должно контролировать канал, т. е. работать на прием.



Рис. 10.3. Циклы работы сети в режимах с централизованным (PCF) и распределенным (DCF) управлением

То, что относительно просто при проводной связи, проблематично в беспроводных коммуникациях — затухание сигнала в эфире намного сильнее, чем в проводе. Поэтому возникают две основные проблемы. Во-первых, весьма сложна, если вообще разрешима, задача контроля несущей передающим устройством (когда оно не знает, что собственный сигнал заведомо намного мощнее, чем сигнал удаленного устройства). Во-вторых, возможна ситуация, когда два устройства (A и B) удалены и не слышат друг друга, однако оба попадают в зону охвата третьего устройства — C (рис. 10.4) — так называемая проблема скрытых станций. Если оба устройства, A и B, начнут передачу, то они принципиально не смогут обнаружить конфликтную ситуацию и определить, почему пакеты не проходят.

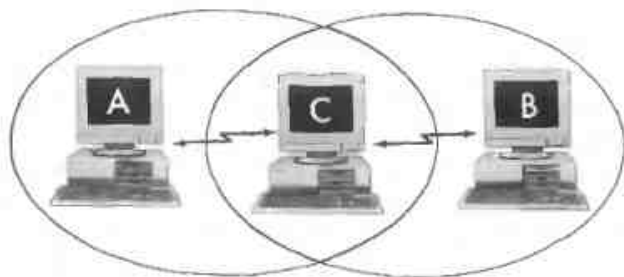


Рис. 10.4. Иллюстрация проблемы скрытых станций

Для устранения подобных проблем в спецификации IEEE 802.11 принят механизм CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) — множественный доступ с контролем несущей и предотвращением коллизий. Перед началом передачи устройство слушает эфир и дожидается, когда канал освободится. Канал считается свободным при условии, что не обнаружено активности в течение определенного промежутка времени — межкадрового интервала (IFS) определенного типа. Если в течение этого промежутка канал оставался свободным, устройство ожидает еще в течение случайного времени отсрочки и, если канал еще не занят, передает пакет. Если пакет предназначен конкретному устройству (не широковещательная или многоадресная передача), то приемник, успешно приняв пакет, посылает передатчику короткий кадр подтверждения получения ACK (ACKnowledge). Если передатчик не принял ACK, он считает посланный пакет утерянным и повторяет процедуру его передачи.

Примечательно, что, если устройство повторно передает пакет, для определения незанятости канала оно должно использовать увеличенный межпакетный интервал (EIFS). Кроме того, время отсрочки выбирается случайным образом на некотором интервале. При первой попытке передачи этот интервал минимален. При каждой последующей он удваивается до тех пор, пока не достигнет заданного предельного значения. Эти меры приводят к тому, что устройство, успешно передавшее пакет, имеет преимущества в захвате канала (кто ошибается, тот дольше ждет).

Перед первой попыткой получить доступ к каналу устройство загружает длительность случайного интервала отсрочки в специальный счетчик. Его значение декрементируется с заданной частотой, пока канал свободен. Как только счетчик обнулится, устройство может занимать канал. Если до обнуления счетчика канал занимает другое устройство, счет останавливается, сохраняя достигнутое значение. При следующей попытке отсчет начинается с сохраненной величины. В результате неуспешный в прошлый раз получает больше шансов занять канал в следующий. В проводных сетях Ethernet подобного механизма нет.

Однако описанные процедуры доступа не избавляют от проблемы скрытых станций. Для ее преодоления используются два дополнительных кадра: RTS (Request to Send — запрос на передачу) и CTS (Clear to Send — подтверждение готовности). Устройство, желающее отправить пакет данных, передает адресату короткий кадр RTS. Если приемное устройство готово к приему, оно выставляет переда-

ющему ответный кадр — CTS. Далее в соответствии с описанной выше процедурой передающее устройство отправляет кадр с данными и дожидается подтверждения АСК.

Стандарт IEEE 802.11 предусматривает два механизма контроля за активностью в канале (обнаружения несущей): физический и виртуальный. Первый механизм реализован на физическом уровне и сводится к определению уровня сигнала в антенне и сравнению его с пороговой величиной. Виртуальный механизм обнаружения несущей основан на том, что в передаваемых кадрах данных, а также в управляющих кадрах АСК и RTS/CTS содержится информация о времени, необходимом для передачи пакета (или группы пакетов) и получения подтверждения. Все устройства сети принимают информацию о текущей передаче и могут определить, сколько времени канал будет занят, т. е. устройство при установлении связи всем сообщает, на какое время оно резервирует канал.

Как мы уже говорили, весь обмен в сетях IEEE 802.11 происходит посредством отдельных кадров (frames). По их структуре особенно четко видно разделение на физический и MAC-уровни. Фактически кадр формируется на MAC-уровне, на физическом уровне к нему добавляется заголовок физического уровня (PLCP). На MAC-уровне пакеты передаются от приложений верхнего уровня. Если их размер превышает максимально допустимый в IEEE 802.11, происходит дефрагментация — большой пакет разбивается на несколько меньших, которые передаются по специальной процедуре.

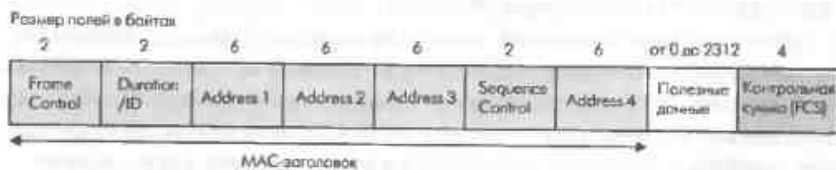


Рис. 10.5. Структура кадров MAC-уровня сети 802.11

Кадры MAC-уровня могут быть трех типов: кадры данных, контрольные (ACK, RTS, CTS и т. п.) и кадры управления (например, Beacon). Их структура одинакова (рис. 10.5). Каждый MAC-кадр включает MAC-заголовок, поле данных (Frame Body) и контрольную сумму CRC. В заголовке передается полная информация о версии протокола стандарта группы IEEE 802.11, типе кадра, системе защиты и т. д. (поле Frame Control); длительности процедуры передачи пакета (Duration/ID), адреса получателя/отправителя (Address 1–4; четыре адресных поля необходимы, если пакеты передаются из под-

сети одной точки доступа в подсеть другой) и информация о последовательности связанных пакетов (Sequence Control). Поле данных может быть различной длины или вовсе отсутствовать (в контрольных кадрах).

10.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b

На физическом уровне к MAC-кадрам (MPDU) добавляется заголовок физического уровня, состоящий из преамбулы и собственно PLCP-заголовка (рис. 10.6). Преамбула содержит стартовую синхропоследовательность (SYNC) для настройки приемника и 16-битный код начала кадра (SFD) — число $F3A0_{16}$. PLCP-заголовок включает поля SIGNAL (информация о скорости и типе модуляции), SERVICE (дополнительная информация, в том числе о примененной высокоскоростных расширений и PBSS-модуляции) и LENGTH (время в микросекундах, необходимое для передачи следующей за заголовком части кадра). Все три поля заголовка защищены 16-битной контрольной суммой CRC.



Рис. 10.6. Структура кадров физического уровня сети 802.11

В стандарте IEEE 802.11b предусмотрено два типа заголовков: длинный и короткий (рис. 10.7). Они отличаются длиной синхропоследовательности (128 и 56 бит), способом ее генерации, а также тем, что символ начала кадра в коротком заголовке передается в обратном порядке. Кроме того, если все поля длинного заголовка передаются со скоростью 1 Мбит/с, то при коротком заголовке преамбула транслируется на скорости 1 Мбит/с, другие поля заголовка — со скоростью 2 Мбит/с. Остальную часть кадра можно передавать на любой из допустимых стандартом скоростей передачи, указанных в полях SIGNAL и SERVICE. Короткие заголовки физического

уровня предусмотрены спецификацией IEEE 802.1b для увеличения пропускной способности сети.

Из описания процедур связи сети IEEE 802.11 видно, что «накладные расходы» в этом стандарте выше, чем в проводной сети Ethernet. Поэтому крайне важно обеспечить высокую скорость передачи данных в канале. Повысить пропускную способность канала с заданной шириной полосы частот можно, разрабатывая и применяя более совершенные методы модуляции. По этому пути пошла группа разработчиков IEEE 802.11b.

Изначально стандарт IEEE 802.11 предусматривал работу в режиме DSSS с использованием так называемой баркеровской последовательности (Barker) длиной 11 бит: $B_1 = 10110111000$. Каждый информационный бит заменяется своим произведением по модулю 2 (операция «исключающее ИЛИ») с данной последовательностью, т. е. каждая информационная единица заменяется на B_1 , каждый ноль — на инверсию B_1 . В результате бит заменяется последовательностью 11 чипов. Далее сигнал кодируется посредством дифференциальной двух- или четырехпозиционной фазовой модуляции (DBPSK или DQPSK, один или два чипа на символ соответственно). При частоте модуляции несущей 11 МГц общая скорость составляет в зависимости от типа модуляции 1 и 2 Мбит/с.



Рис. 10.7. Короткий заголовок кадров сети 802.11b

Стандарт IEEE 802.11b дополнительно предусматривает скорости передачи 11 и 5,5 Мбит/с. Для этого используется так называемая ССК-модуляция (Complementary Code Keying — кодирование комплементарным кодом). В основу данного метода легли работы специалистов компаний Intersil (ранее — Hitris Semiconductor) и отчасти Agere Systems (полупроводниковое подразделение, выделенное из Lucent Technologies). Первым, по-видимому, изложил идею бинарных комплементарных кодов Марсель Голей (M.J.E. Golay), более полувека назад описав их принцип и методы генерации [54]. Суть комплементарного кодирования состоит в использовании двух последовательностей a и b , каждая из k элементов, с автокорреляци-

онными функциями:

$$A(i) = \sum_{j=1}^{k-i} a_j a_{j+i} \quad \text{и} \quad B(i) = \sum_{j=1}^{k-i} b_j b_{j+i},$$

где $i = 0, \dots, k-1$ — возможный сдвиг. Последовательности a и b комплементарны, если $A(i) + B(i) = 0$ при любом $i \neq 0$, и $A(0) + B(0) = 2k$. Физическая интерпретация автокорреляции со сдвигом — одновременный прием прямо распространяющегося сигнала и сигнала с фазовой задержкой на i элементов (чипов). Иными словами, если система связи, использующая комплементарное кодирование, работает в условиях многорулевого распространения сигналов, то в идеале межсимвольная интерференция (вызванная наложением сигналов с задержками распространения) должна отсутствовать, поскольку сумма их автокорреляционных функций равна нулю.

Метод ССК использует дифференциальную квадратурную модуляцию (DQPSK) в радиотракте. ССК-модуляция строится на выделении из последовательного информационного потока групп по 8 бит (d_0-d_7). Эти 8 бит определяют информационный символ C из восьми комплексных чипов $C = [c_0, \dots, c_7]$. Используя представление Эйлера, можно записать: $c_i = e^{j\psi_i} = \cos \psi_i + j \sin \psi_i$, где ψ_i — фаза чипа; $j = \sqrt{-1}$. Чипы являются комплексными, поскольку применительно к квадратурной модуляции действительная и мнимая составляющие относятся к синфазному (I) и квадратурному (Q) каналам соответственно.

Восемь чипов информационного символа последовательно модулируют несущую с частотой модуляции 11 МГц. Фаза ψ_i каждого из них определяется в соответствии с формулой

$$C = [c_0, \dots, c_7] = [e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_3+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_4)}, e^{-(\phi_1+\phi_4)}, e^{j(\phi_1+\phi_2+\phi_3)}, e^{j(\phi_1+\phi_3)}, e^{-(\phi_1+\phi_2)}, e^{j\phi_1}]. \quad (10.1)$$

Иначе эту формулу можно записать для вектора Ψ фаз чипов символа C :

$$\begin{aligned} \Psi &= [\psi_0, \dots, \psi_7] = \\ &= [\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4; \phi_1 + \phi_3 + \phi_4; \phi_1 + \phi_2 + \phi_4; \\ &\quad -(\phi_1 + \phi_4); \phi_1 + \phi_2 + \phi_3; \phi_1 + \phi_3; -(\phi_1 + \phi_2); \phi_1]. \end{aligned} \quad (10.2)$$

Элемент ϕ_1 входит в каждый чип символа, т. е. изменяет фазу всего символа. Фазовая модуляция сигнала называется дифференциальной, поскольку значение ϕ_1 текущего символа определяется относительно значения ϕ_1 предшествующего символа. Именские

фазы ϕ_1 задается в зависимости от значений двухразрядных двоичных чисел (дубитов) (d_0d_1). При этом для четных символов установлено следующее соответствие (d_0d_1) $\rightarrow \Delta\phi_1$: (00) $\rightarrow 0$; (01) $\rightarrow \pi/2$; (11) $\rightarrow \pi$; (10) $\rightarrow -\pi/2$. Для нечетных символов значение ϕ_1 дополнительно смещают на π .

Как мы уже отметили, в стандарте IEEE 802.11b посредством ССК кодируют только MAC-кадр. Поэтому первый ССК-символ — тот, что следует сразу за символами заголовка физического уровня. Он имеет номер «0», т. е. является четным. Фаза последнего QPSK-символа заголовка кадра является опорной для определения ϕ_1 первого символа информационного поля — к нему добавляется $\Delta\phi_1$. Остальные три параметра имеют абсолютные значения. Для скорости 11 Мбит/с они определяются как $\phi_2 = (d_2d_3) \cdot \pi/2$; $\phi_3 = (d_4d_5) \cdot \pi/2$; $\phi_4 = (d_6d_7) \cdot \pi/2$, где ($d_i d_{i+1}$) — двухразрядные двоичные числа.

Для скорости 5,5 Мбит/с также используется DQPSK-модуляция, но ССК-символ (из восьми чипов) определяют не восемь, а четыре информационных бита (d_0-d_3), поэтому и скорость вдвое ниже. Параметр ϕ_1 вычисляется так же, как и для 11 Мбит/с, остальные иначе: $\phi_2 = d_2 \cdot \pi + \pi/2$; $\phi_3 = 0$; $\phi_4 = d_3\pi$.

На приемной стороне, при условии синхронного приема, декодирующее устройство восстанавливает значения $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$, а по ним — и значения информационных бит. В простейшем случае обработка сводится к следующим вычислениям:

$$\phi_2 = \arg\{r_1r_2^* + r_3r_4^* + r_5r_6^* + r_7r_8^*\},$$

$$\phi_3 = \arg\{r_1r_3^* + r_2r_4^* + r_5r_7^* + r_6r_8^*\},$$

$$\phi_4 = \arg\{r_1r_5^* + r_2r_6^* + r_3r_7^* + r_4r_8^*\},$$

$$\phi_1 = \arg\{r_4e^{-j\phi_4} + r_6e^{-j\phi_3} + r_7e^{-j\phi_2} + r_8\},$$

где $r = [r_1, \dots, r_8]$ — принятая 8-битная последовательность ССК-символов. Знак * означает комплексное сопряжение, т. е. если $r_i = a + jb$, то $r_i^* = a - jb$. Функция $\arg(r) = \arctg[\text{Im}(r)/\text{Re}(r)] = \arctg(b/a)$.

В чем достоинство ССК-модуляции? Как видно из формулы (10.2), фазы чипов символа (вектора) \mathbf{C} определяются на основе последовательностей Уолша-Адамара. Если записать вектор $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4]$, то для скорости 11 Мбит/с вектор $\Psi = (\Phi \times \mathbf{WH} + \mathbf{B})$, где \mathbf{WH} — верхняя половина матрицы Уолша-Адамара:

$$\mathbf{WH} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вектор $\mathbf{B} = [0, 0, 0, \pi, 0, 0, \pi, 0]$, физически соответствующий повороту фазы чипов c_3 и c_6 на 180° (знаки «минус» в формуле (10.1)), необходим для улучшения корреляционных свойств кодовых последовательностей. Последовательности Уолша-Адамара хорошо изучены, обладают отличными автокорреляционными свойствами. Что немаловажно, каждая такая последовательность мало коррелирует сама с собой при фазовом сдвиге — очень полезное свойство при борьбе с переотраженными сигналами. Нетрудно заметить, что теоретическое усиление обработки при ССК-модуляции 3 дБ (в 2 раза), поскольку без кодирования комплементарным полифазным кодом сигнал, модулированный QPSK с частотой 11 Мсимвол/с, может транслировать 22 Мбит/с. Как видно, ССК-модуляция представляет собой вид блочного кода, а потому достаточно проста при аппаратной реализации. Совокупность этих свойств и обеспечила ССК место в стандарте IEEE 802.11b в качестве обязательного вида модуляции.

На практике важно не только операционное усиление. Существенную роль играет и равномерность распределения символов в фазовом пространстве (расстояние Хэмминга) — символы должны как можно дальше отстоять друг от друга, чтобы минимизировать ошибки их детектирования. И с этой точки зрения ССК-модуляция не выглядит оптимальной, ее реальное операционное усиление не превышает 2 дБ. Поэтому изначально прорабатывался другой способ модуляции — пакетное бинарное сверточное кодирование РВСС (Packet Binary Convolutional Coding). Этот метод вошел в стандарт IEEE 802.11b опционально, т. е. как необязательная опция. Механизм РВСС (рис. 10.8) был предложен специалистами фирмы Alantro Communications, в 2000 г., вошедшей в состав компании Texas Instruments. РВСС позволяет добиваться в сетях IEEE 802.11b пропускной способности 5,5; 11 и 22 Мбит/с.



Рис. 10.8. Общая схема РВСС-модуляции

Как следует из названия, метод основан на сверточном кодировании. Для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с поток информационных бит по-

стует в 6-разрядный сдвиговый регистр с сумматорами (рис. 10.9, а). В начальный момент времени все триггеры сдвигового регистра инициализируют нулем. В результате каждый исходный бит d заменяется двумя битами кодовой последовательности (c_0, c_1). При скорости 11 Мбит/с c_0 и c_1 задают один символ четырехпозиционной QPSK-модуляции. Для скорости 5,5 Мбит/с используют двухпозиционную BPSK-модуляцию, последовательно передавая кодовые биты c_0 и c_1 . Если же нужна скорость 22 Мбит/с, схема кодирования усложняется (рис. 10.9, б): три кодовых бита (c_0-c_2) определяют один символ в восьмипозиционной 8-PSK-модуляции.

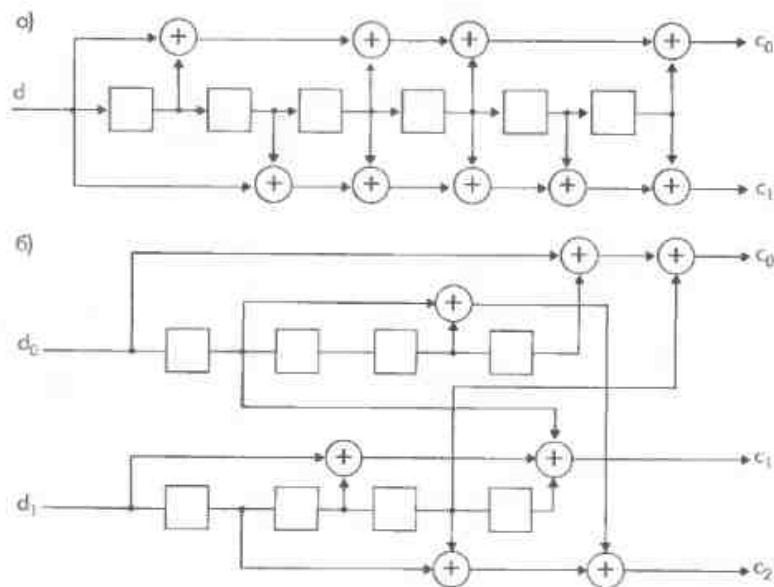
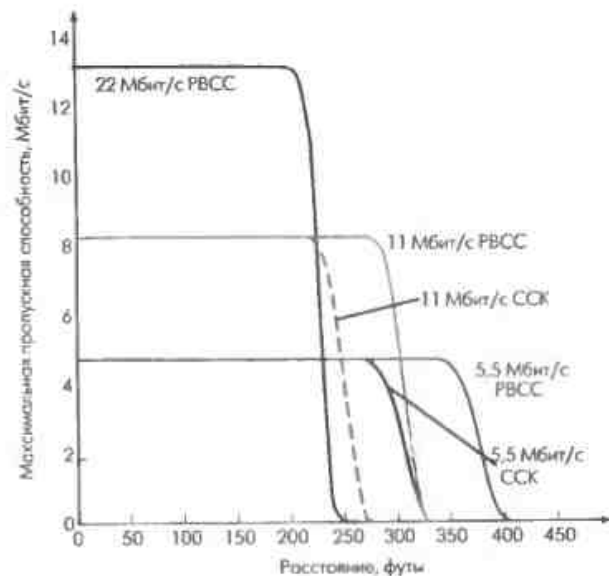


Рис. 10.9. Схема сверточного VCC-кодирования: а — для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с; б — для скорости 22 Мбит/с

После формирования PSK-символов происходит скремблирование. В зависимости от сигнала s (см. рис. 10.8) символ остается без изменений ($s = 0$) либо его фаза увеличивается на $\pi/2$ ($s = 1$). Значение s определяет 256-битная циклически повторяющаяся последовательность S . Она формируется на основе начального вектора $U = 338B_{16}$, в котором равное число нулей и единиц. S представляет собой 16 последовательных векторов U_i ($i = 0, \dots, 15$), причем каждый вектор U_i циклически сдвинут влево по сравнению с U_{i-1} на $3i$ разряда.

У 6-разрядного сдвигового регистра, применяемого в RVCC для скоростей 11 и 5,5 Мбит/с, 64 возможных выходных состояния. Так что при модуляции RVCC информационные биты в фазовом пространстве оказываются гораздо дальше друг от друга, чем при CCK-модуляции. Поэтому RVCC и позволяет при одних и тех же соотношениях сигнал/шум и уровне ошибок вести передачу с большей скоростью, чем в случае CCK (рис. 10.10). Однако плата за более эффективное кодирование — сложность аппаратной реализации данного алгоритма. Видимо, не случайно продвигать RVCC-модуляцию стала компания Texas Instruments — ведущий производитель процессоров цифровой обработки сигнала.

Рис. 10.10. Дальность связи при различных способах модуляции и фиксированном затухании в канале (по материалам компании Texas Instruments о применении ИС ACX100)



10.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b

Чипсеты для оборудования сетей IEEE 802.11b производят многие компании. Кроме упомянутой Texas Instruments, прежде всего следует отметить линейку чипсетов PRISM корпорации Intersil. Первый ее чипсет для беспроводных ЛВС включал восемь основных микросхем и сразу привлек к себе внимание разработчиков аппаратуры. Следующий чипсет PRISM 2 можно рассматривать как базовый для последующих модификаций. В состав PRISM 2 (рис. 10.11)

входят четыре ИС: MAC-контроллер HFA3841, baseband-процессор HFA3861B, квадратурный модулятор/демодулятор на промежуточной частоте (ПЧ) HFA3783 и ВЧ/ПЧ-конвертер HFA3683A. Как правило, для передачи требуется высокочастотный антенный усилитель, например HFA3963. Меньше чем через год появилась модификация PRISM 2,5, в которой MAC-контроллер и baseband-процессор были интегрированы в одной ИС (ISL3873B), поддерживающей к тому же интерфейсы PCMCIA и USB.

Следующим шагом стало создание к лету 2001 г. чипсета PRISM 3 на основе фирменной архитектуры прямого преобразования частоты ZIF (Zero IF, нулевая ПЧ) без использования ПЧ.

Отметим и объявленный чипсет компании Philips Semiconductors, первая ИС которого — однокристалльный трансивер SA2400 для диапазона 2,4 ГГц — была анонсирована в июле 2001 г. Данная ИС также построена по принципу прямого преобразования (без ПЧ) и содержит блоки приемника, передатчика, квадратурного модулятора/демодулятора, задающего генератора на основе ГУН и fractional-N-синтезатора, а также выходного малопомощного усилителя. В составе ИС — полностью интегрированные полосовые канальные фильтры, устройство автоматического контроля усиления, трехпроводная шина управления основными блоками устройства, интерфейс для сопряжения с baseband-процессором и т. д. Вторая микросхема чипсета — SA2440 — это интегрированные baseband-процессор и MAC-контроллер. Об аналогичном чипсете Am1772 на базе процессора Alchemy, который включает трансивер Am1770 и baseband/MAC-процессор Am1771, объявила и компания AMD.

В ноябре 2002 г. корпорация Agere Systems анонсировала свой новый чипсет, в состав которого входят две ИС: контроллер физического уровня и MAC-контроллер. ИС WL1141 — однокристалльный контроллер физического уровня, включающий как baseband-процессор, так и аналоговую ВЧ-часть (рис. 10.12). Вместе с MAC-контроллером WL60010 он образует полный чипсет для устройств IEEE 802.11b.

Надо отметить, что модуляцию RBSS поддерживают практически только продукты компании Texas Instruments. Первой ИС, реализующей RBSS, стала ACX100 — однокристалльный MAC-контроллер с baseband-процессором. Эта ИС, кроме обязательных для стандарта IEEE 802.11b опций, поддерживает RBSS-модуляцию со скоростями 5,5; 11 и 22 Мбит/с. Среди других особенностей микросхемы — аппаратная поддержка 32-разрядных шин CardBus и PCI, последовательного интерфейса USB 1.1, а также интерфейса Ethernet. Интересно отметить, что при испытаниях устройств на основе этой

схемы при одном и том же уровне пакетных ошибок ($PER = 10^{-2}$) и скорости передачи 11 Мбит/с работа в режиме CCK была возможной при отношении сигнал/шум 8,5 дБ, а применение RBSS позволяло ухудшить это соотношение до 4,5 дБ.

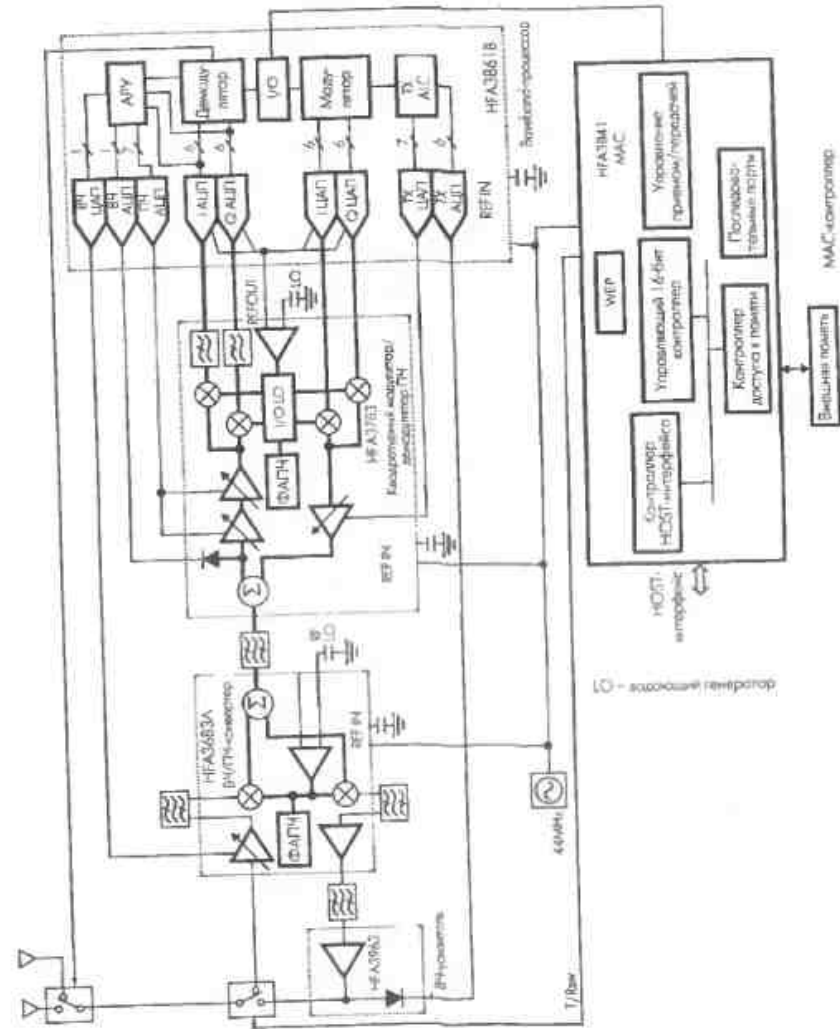


Рис. 10.11. Структурная схема устройства на базе чипсета PRISM 2

Однако, несмотря на все усилия Texas Instruments, режим 22 Мбит/с так и не вошел в стандарт IEEE 802.11b, хотя даже появилось обо-

значение «IEEE 802.11b+» и устройства на основе ACX100 начали производить такие известные компании, как D-Link и NDC. Не получили распространения и сети со скоростью 22 Мбит/с. Видимо, тут играют роль два обстоятельства. Прежде всего, процедура стандартизации — это конкуренция за получение значительных финансовых прибылей в виде лицензионных отчислений тому, чья технология стала стандартной. В данном случае столкнулись интересы двух гигантов полупроводниковой индустрии — компаний Intersil и Texas Instruments. Поддерживать одновременно два вида модуляции сложно в финансовом и техническом отношении, поэтому и был принят CCK-вариант.

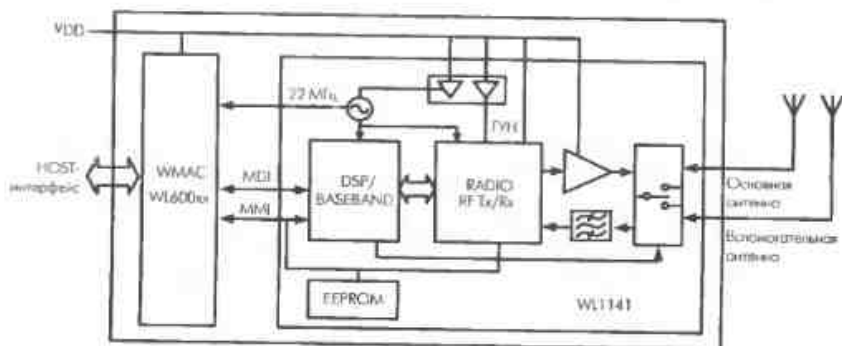


Рис. 10.12. Чипсет компании Agere Systems

С другой стороны, скорости порядка 22 Мбит/с стали мало интересны для потребителей, так как стандарты IEEE 802.11a и g открыли перед ними новые перспективы — до 54 Мбит/с.

10.6. Стандарт IEEE 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a появился практически одновременно со стандартом IEEE 802.11b, в сентябре 1999 г. Он ориентирован на работу в диапазоне 5 ГГц и основан на технологии OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing — мультиплексирование посредством ортогональных несущих).

10.6.1. Формирование OFDM-символов

Технология OFDM означает, что одновременно информация передается по многим поднесущим частотам, образующим канал. Ши-

рина канала — 20 МГц. В сетях IEEE 802.11a в 20-МГц канале используются 52 поднесущие, однако их номинальное число выбирается из соображений удобства преобразования Фурье и принимается равным 64. Таким образом, интервал между поднесущими $\Delta f = 20 \text{ МГц} / 64 = 312,5 \text{ кГц}$, а сами поднесущие можно представить как $f_k(t) = a_k \sin[2\pi(f_0 + k\Delta f)t + \phi_k]$, где $k = -26, \dots, 26$. Центральная поднесущая f_0 не используется (ее амплитуда всегда равна нулю). Поднесущие модулируются посредством квадратурной амплитудно-фазовой модуляции: 2-, 4- 16- и 64-позиционной BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM, соответственно. Сигнал удобно представлять в комплексной форме $C = a \cos x + b \sin x = Ae^{jx}$, где $j = \sqrt{-1}$. Соответственно суммарный сигнал на всех поднесущих можно записать как

$$s(t) = \sum_{k=-26}^{26} C_k e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \quad (10.3)$$

Здесь C_k — комплексная амплитуда k -й поднесущей, мнимая и действительная составляющие которой соответствуют квадратурному (Q) и синфазному (I) каналам квадратурной модуляции. Значения комплексных составляющих выбираются в соответствии с диаграммами Грея (рис. 10.13), исходя из потока информационных бит.

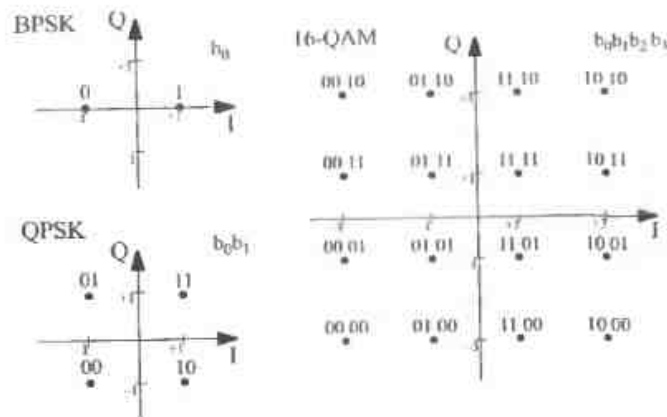


Рис. 10.13. Представление модуляционных символов (диаграммы Грея) для BPSK, QPSK и 16-QAM

OFDM-символ представляет собой совокупность всех поднесущих на дискретном интервале длительностью $T_F = 1/\Delta f = 3,2 \text{ мкс}$. Информационная емкость OFDM-символа определяется типом мо-

дуляции информационных поднесущих и их числом. Из 52 поднесущих в стандарте IEEE 802.11a для передачи данных используются 48, остальные 4 поднесущие — пилотные. Следовательно, емкость OFDM-символа составляет $48 \times N_b$, где N_b — число бит в одном модуляционном символе (на одной поднесущей), равное двоичному логарифму от числа позиций модуляции. Таким образом, OFDM-символ содержит от 96 до 288 бит.

Отметим, OFDM-модуляция обладает мощным средством борьбы с межсимвольной интерференцией, проявляющейся в том, что из-за множественных переотражений в приемник одновременно поступают два смежных символа — прямо распространяющийся и «запоздавший». Это ведет к потере символов. В случае OFDM-модуляции, которая допускает небольшую скорость передачи данных на одной поднесущей, в каждый OFDM-символ добавляется защитный интервал GI. В стандарте IEEE 802.11a его длительность равна $T_F/4 = 0,8$ мкс. Следовательно, длительность всего символа $T_S = T_{GI} + T_F = 4$ мкс. Защитный интервал транслируется в начале OFDM-символа и представляет собой копию его последних 0,8 мкс. В результате отраженный и пришедший с задержкой символ попадает в защитный интервал и не повреждает прямо распространяющийся символ.

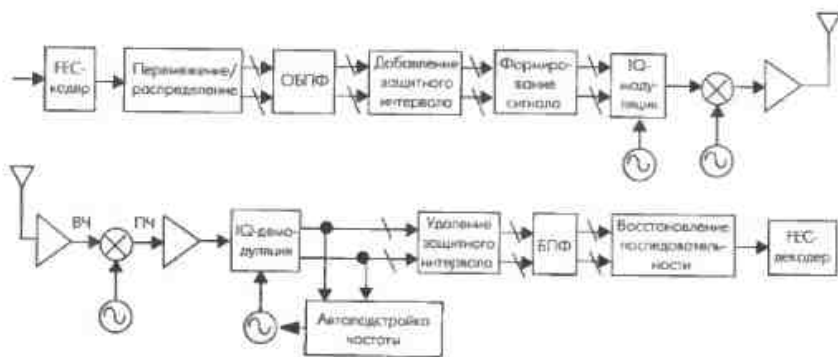


Рис. 10.14. Функциональная схема трактов приема/передачи стандарта IEEE 802.11a

Рассмотрим процедуры формирования выходного сигнала в стандарте IEEE 802.11a (рис. 10.14). Входной поток данных (бит) прежде всего подвергается скремблированию (в данном случае рандомизации) посредством перемножения на псевдослучайную последовательность (ПСП) с циклом повторения 127. Ее формирует генератор с задающим полиномом $G(x) = x^7 + x^4 + 1$ и начальным значением

1111111. При передаче конкретного пакета вектор инициализации генератора ПСП может быть произвольным, но должен принадлежать ПСП. Приемник восстанавливает его, поскольку известно, что последние 7 бит поля данных (младшие биты поля SERVICE заголовка, см. далее) перед скремблированием всегда равны нулю.

После скремблирования поток данных поступает на сверточный кодер (FEC). Исходя из выбранной скорости передачи данных, скорость кодирования может составлять $1/2$, $2/3$ и $3/4$. Напомним, скорость кодирования — это отношение числа бит в пакете до и после кодера (скорость кодирования $r = 1/2$ означает, что каждый входной бит после кодирования превращается в два бита). Поскольку у кодера два выхода, каждому входному биту x_i соответствует пара бит (y_i, z_i) . Значения скорости кодирования, отличные от $1/2$, получаются путем исключения из выходной последовательности отдельных значений y_i или z_i (процедура выкалывания).

Далее поток кодированных бит подвергается перемежению (интерливингу) — изменяется порядок битов в последовательности в рамках OFDM-символа. Вся последовательность кодированных бит разбивается на блоки, длина которых равна числу бит в OFDM-символе (N_{CBPS}) при выбранной скорости передачи. В пределах блока биты нумеруются от 0 до $N_{CBPS} - 1$. Затем происходит двухстадийная перестановка. Цель первого этапа — добиться, чтобы смежные биты кодовой последовательности оказались на несмежных поднесущих. Первый этап перемежения эквивалентен тому, что данные последовательно по строкам записываются в таблицу из 16 строк и $N_{CBPS}/16$ столбцов, а затем последовательно считываются по столбцам (т. е. считываются в порядке записи, но из транспонированной таблицы).

После второго этапа перестановки смежные биты оказываются попеременно в старших и младших разрядах группы, определяющих модуляционный символ квадратурной модуляции (см. рис. 10.13). Это делается для того, чтобы соседние биты не оказались в младших разрядах, надежность передачи которых наиболее низка. Математически процедура перемежения выражается двумя уравнениями, в которых k — номер бита в кодированной последовательности, i — его номер после первого этапа стадии перестановок, j — после второго (окончательный):

$$\begin{aligned} i &= (N_{CBPS}/16) \cdot (k \bmod 16) + \text{floor}(k/16); \\ j &= s \cdot \text{floor}(i/s) + (i + N_{CBPS} - \text{floor}[16 \cdot i/N_{CBPS}]) \bmod s; \\ s &= \max(N_{BPS}/2, 1), \end{aligned}$$

где N_{BPSK} — число бит на поднесущую. Функция $x \bmod n$ — значение x по модулю n , значение функции $\text{floor}(x)$ равно наибольшему целому числу, не превышающему x . После интерливинга последовательность бит разбивается на группы по числу позиций выбранной квадратурной модуляции (1; 2; 4 или 6) и в соответствии с диаграммами Грея определяют значения синфазной (младшие биты) и квадратурной (старшие биты) составляющих комплексных амплитуд. Полученные из диаграмм Грея значения амплитуд умножаются на нормировочный коэффициент 1, $1/\sqrt{2}$, $1/\sqrt{10}$, $1/\sqrt{42}$ для BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM соответственно. В результате получают значения комплексных амплитуд C_k , используемых в формуле (10.3). Различные сочетания скоростей кодирования и методов модуляции поднесущих и определяют набор скоростей передачи данных в стандарте IEEE 802.11a (табл. 10.1).

Таблица 10.1. Параметры OFDM-символов для различных скоростей передачи данных в стандарте IEEE 802.11a

Скорость передачи данных, Мбит/с	Модуляция	Скорость кодирования	Кодированных бит на несущую (N_{BPSK})	Кодированных бит в OFDM-символе (N_{CBPS})	Информационных бит в OFDM-символе (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Сформированный OFDM-символ подвергается обратному быстрому преобразованию Фурье (ОБПФ), в результате чего формируются выходные синфазный и квадратурный сигналы. К ним добавляется защитный интервал, после чего происходит окончательное формирование аналогового сигнала. Дальнейшая обработка стандартна — квадратурный модулятор, гетеродин для переноса сигнала в заданную область (если это необходимо) и выходные усилители. Если используется гетеродин, в формуле (10.3) $f_0 = 0$. В приемнике преобразование выполняется в обратном порядке (см. рис. 10.14).

10.6.2. Структура пакетов физического уровня

Пакеты MAC-уровня в IEEE 802.11a стандартны: сначала следует MAC-заголовок, содержащий адреса приемника и передатчика, а также служебную информацию, далее — собственно данные (поле данных), за ними — контрольная сумма (CRC). Сформированный пакет MAC-уровня (MPDU) встраивается в пакет физического уровня. Здесь и начинаются различия с базовым документом IEEE 802.11.

На физическом уровне кадр представляет собой последовательность в составе преамбулы, заголовка (PLCP-заголовок) и поля данных, за которым следуют так называемые хвостовые биты (Tail, равны нулю и обозначают конец поля) и заполняющие биты (Pad), предназначенные для выравнивания длины пакета (рис. 10.15). Преамбула содержит 12 OFDM-символов. Все поля заголовка, кроме SIGNAL, передаются посредством одного OFDM-символа, причем с наименьшей из возможных скоростей (номинальное значение 6 Мбит/с). Оставшаяся часть заголовка и поле данных транслируются с любой заданной скоростью из списка возможных (см. табл. 10.1).



Рис. 10.15. Структура пакетов физического уровня стандарта IEEE 802.11a

Собственно преамбула (рис. 10.16) включает 10 коротких настроечных последовательностей и 2 длинные последовательности. OFDM-символы коротких последовательностей формируются на основе лишь 12 поднесущих, при этом применяется четырехпозиционная QPSK-модуляция. Длительность короткой настроечной последовательности — 0,8 мкс, защитных интервалов между ними нет. Короткие настроечные последовательности предназначены для автоматической настройки усилителей сигнала (АРУ), а также временной и частотной синхронизации.

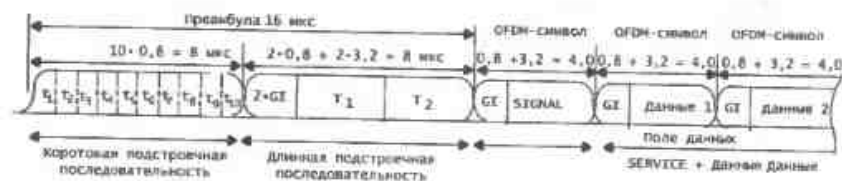


Рис. 10.16. Последовательность передаваемых данных в стандарте IEEE 802.11a

Две длинные настроенные последовательности следуют за короткими с промежутком в два защитных интервала $GI = 0,8$ мкс. Каждой из них соответствуют OFDM-символы, включающие 53 поднесущие, в том числе центральную f_0 . Поднесущие модулируются посредством двухпозиционной BPSK, длительность символов — 3,2 мкс, защитных интервалов нет. Длинные последовательности предназначены для оценки канала и точной частотной подстройки приемников. Таким образом, длительность трансляции преамбулы составляет 16 мкс.

За преамбулой следует PLCP-заголовок физического пакета. Он состоит из двух фрагментов — SIGNAL и SERVICE. Фрагмент SIGNAL всегда занимает один OFDM-символ и транслируется посредством BPSK-модуляции со скоростью кодирования $1/2$, т. е. максимально надежно. Он не скремблируется. В SIGNAL передается информация о скорости передачи поля данных (поле RATE) и длине пакета (LENGTH). Для надежности используется бит контроля четности (Parity). Шесть последних бит (Tail), всегда равных нулю, обозначают конец фрагмента SIGNAL.

Фрагмент SERVICE (16 бит) формально принадлежит заголовку, но входит в поле данных и передается с выбранной для передачи данных скоростью. Используются только младшие семь бит поля SERVICE (для инициализации генератора ПСП в приемнике), перед скремблированием они всегда равны нулю. Остальные девять бит в стандарте IEEE 802.11a не задействованы.

Поле данных завершают 6 разделительных нулевых бит (Tail). Они добавляются после скремблирования и служат как дополнительное средство контроля ошибок, поскольку в приемнике после сверточного декодера также должны оказаться равными нулю. Кроме того, в конце пакета добавляются специальные биты заполнения Pad (равны нулю), так чтобы общая длина поля данных (включая SERVICE) оказалась кратной числу бит в OFDM-символе при выбранной скорости передачи данных.

Диапазон 5,1–5,9 ГГц хорош тем, что там гораздо проще найти широкую полосу для системы связи. В США для безлицензионной работы в этом диапазоне выделены полосы 5,15–5,35 и 5,725–5,825 ГГц — всего 300 МГц по сравнению с 83 МГц в диапазоне 2,4 ГГц. Вместо трех неперекрывающихся каналов в диапазоне 2,4 ГГц для сетей IEEE 802.11b только в нижнем поддиапазоне 5,15–5,35 ГГц имеются восемь неперекрывающихся каналов (рис. 10.17). Аналогичная ситуация в Европе и в России (однако в нашей стране отсутствуют безлицензионные диапазоны) — в более высокочастотной области места больше.

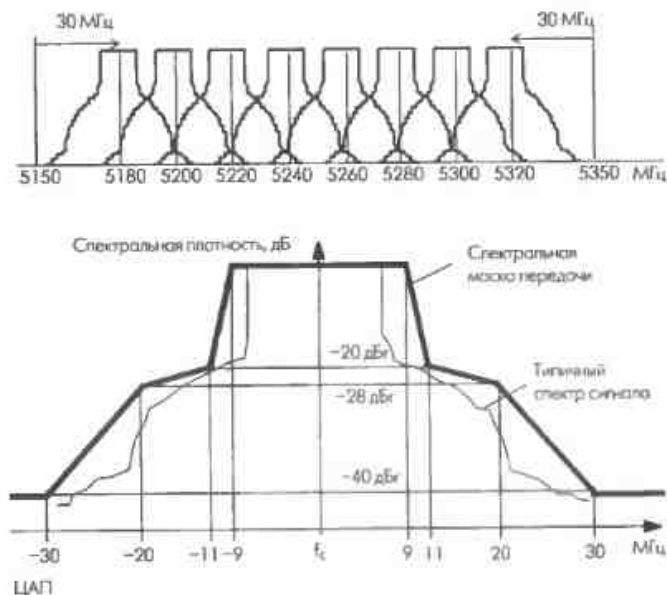


Рис. 10.17. Спектральная маска и распределение неперекрывающихся каналов в диапазоне 5,15–5,35 ГГц для стандарт IEEE 802.11a. Мощность (дБн) определяется относительно пиков функции $\sin(x)/x$

Кроме того, диапазон 2,4 ГГц перегружен различными системами связи — тут и беспроводные телефоны, и устройства Bluetooth (IEEE 802.15.1), и многочисленное оборудование стандарта IEEE 802.11b. Взаимных помех избежать тяжело. Сравнительные испытания убедительно показывают, что в одних и тех же условиях устройства IEEE 802.11a по скорости обмена превосходят оборудование IEEE 802.11b (рис. 10.18). И до недавнего времени казалось, что будущее принадлежит сетям стандарта IEEE 802.11a. Однако возник ряд вопросов.

Прежде всего, как быть с уже существующими сетями (и оборудованием) в диапазоне 2,4 ГГц? Как обеспечить столь необходимую всем обратную совместимость? С этой проблемой производители справились, разработав двухдиапазонные чипсеты. Характерный пример — компания Atheros, создавшая комплект из трех ИС AR5001X Combo. В его составе ИС baseband-процессора и MAC-контроллера AR5211 и две аналоговые ИС трансиверов — на 2,4 и на 5 ГГц (AR2111 и AR5111 соответственно). Аналогичное решение предложено и компанией Intersil — чипсет PRISM Duette из двух ИС (рис. 10.23): baseband/MAC-процессор ISL3890 и однокристалльный двухдиапазонный трансивер ISL3690.

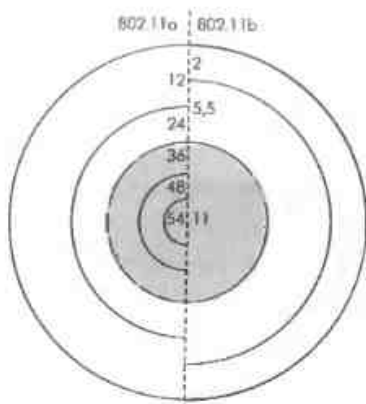


Рис. 10.18. Соотношение скоростей передачи и радиусов действия устройств стандартов 802.11a и 802.11b (по материалам компании Proxim)

Однако к моменту, когда данные решения стали технологически возможны и рентабельны, в Европе был разработан свой стандарт 5 ГГц — HiperLan2 (правда, так и не нашедший поддержки со стороны производителей аппаратуры). Кроме того, работы по ускорению стандарта IEEE 802.11b в диапазоне 2,4 ГГц привели к появлению новой версии — IEEE 802.11g, предусматривающей скорости до 54 Мбит/с. В частности, упомянутые выше чипсеты AR5001X Combo и PRISM Duette в диапазоне 2,4 ГГц поддерживают не только IEEE 802.11b, но и IEEE 802.11g.

10.7. Стандарт IEEE 802.11g

Работы над будущей спецификацией IEEE 802.11g начались в марте 2000 г., когда была сформирована исследовательская группа по

изучению возможности увеличения скорости передачи данных свыше 20 Мбит/с в диапазоне 2,4 ГГц. В ноябре 2000 г. эта группа приобрела статус штатной группы разработчиков и получила обозначение G. Через полтора года, рассмотрев несколько альтернативных подходов, специалисты исследовательской группы G предложили использовать применяющуюся в стандарте IEEE 802.11a систему кодирования с мультиплексированием посредством ортогональных несущих OFDM. В качестве опциональных возможностей новый стандарт IEEE 802.11g предусматривал использование таких схем модуляции, как ССК-OFDM и PBSS.

Новая спецификация по сути представляет собой перенесение схемы модуляции OFDM, прекрасно зарекомендовавшей себя в 802.11a, из диапазона 5 ГГц в область 2,4 ГГц. Это возможно, поскольку в стандартах 802.11 ширина одного канала в диапазоне 2,4 и 5 ГГц схожа — 22 МГц по уровню -30 и -20 дБ соответственно. Правда, по уровню -28 дБ маска канала в IEEE 802.11a допускает спектральную полосу шириной 40 МГц, что может создать проблемы, безусловно, преодолимые.

Зачем нужен новый стандарт в диапазоне 2,4 ГГц, когда оборудование 802.11a для диапазона 5 ГГц становится практически массовым? Однозначного ответа здесь нет, укажем лишь на основные резоны. Прежде всего, оборудование 2,4 ГГц должно быть дешевле. Если сравнивать стоимость аналогичного оборудования одной компании стандартов 802.11a и b, цены в первом случае окажутся в среднем в 1,5 раза выше. Однако на уровне интегральных схем различие не столь значительное и, безусловно, имеет тенденцию к снижению. Кроме того, затухание сигналов в диапазоне 5 ГГц выше, чем в диапазоне 2,4 ГГц. Поэтому плотность оборудования в сетях 5 ГГц тоже должна быть выше, вместе с ценой сети. Конечно, минус этот относительный, поскольку в ряде случаев зону распространения сигналов оборудования локальной сети даже желательно ограничить, например, из соображений защиты информации или чтобы избежать взаимного влияния двух разных сетей.

Одним из основных требований к спецификации 802.11g была обратная совместимость с устройствами 802.11b. Это требование привело к очередному столкновению интересов компаний Intersil и TI. Действительно, в стандарте 802.11b в качестве основного способа модуляции принята схема ССК (Complementary Code Keying), а в качестве дополнительной возможности допускается модуляция PBSS. В последней крайне заинтересована компания TI. Разработчики 802.11g предусмотрели ССК-модуляцию для скоростей до 11 Мбит/с и OFDM

для более высоких скоростей. С этим были согласны все. Но сети стандарта 802.11 при работе используют принцип CSMA/CA — множественный доступ к каналу связи с контролем несущей и предотвращением коллизий. Ни одно устройство 802.11 не должно начинать передачу, пока не убедится, что эфир в его диапазоне свободен от других устройств. Если в зоне слышимости окажутся устройства 802.11b и 802.11g, причем обмен будет происходить между устройствами 802.11g посредством OFDM, то оборудование 802.11b просто не поймет, что другие устройства сети ведут передачу, и попытается начать трансляцию. Последствия очевидны.

Преамбула/
заголовок

OFDM	OFDM
CCK	CCK
CCK	OFDM
CCK	PBSS

Обязательно
Возможно

Чтобы подобную ситуацию не допустить, предусмотрена возможность работы в смешанном режиме — CCK-OFDM. Информация в сетях 802.11 передается кадрами. Каждый информационный кадр включает два основных поля: преамбулу с заголовком и информационное поле (рис. 10.19). Преамбула содержит синхропоследовательность и код начала кадра, заголовок — служебную информацию, в том числе о типе модуляции, скорости и продолжительности передачи кадра. В режиме CCK-OFDM преамбула и заголовок модулируются методом CCK (реально — путем прямого расширения спектра DSSS посредством последовательности Баркера, поэтому в стандарте 802.11g этот режим именуется DSSS-OFDM), а информационное поле — методом OFDM.

Таким образом, все устройства 802.11b, постоянно «прослушивающие» эфир, принимают заголовки кадров и узнают, сколько времени будет транслироваться кадр 802.11g. В этот период они «молчат». Естественно, пропускная способность сети падает, поскольку скорость передачи преамбулы и заголовка — 1 Мбит/с.

Видимо, данный подход не устраивал лагерь сторонников технологии PBSS, и для достижения компромисса в стандарт 802.11g в качестве дополнительной возможности ввели, так же как и в 802.11b, необязательный режим — PBSS, в котором заголовок и преамбула передаются так же, как и при CCK, а информационное поле модулируется по схеме PBSS и передается на скорости 22 или 33 Мбит/с. В результате устройства стандарта 802.11g должны оказаться совместимыми со всеми модификациями оборудования 802.11b и не соз-

давать взаимных помех. Диапазон поддерживаемых им скоростей отражен в табл. 10.2, зависимость скорости от типа модуляции — на рис. 10.20.

Таблица 10.2. Возможные скорости и тип модуляции в спецификации IEEE 802.11g

Скорость, Мбит/с	Тип модуляции	
	Обязательно	Допустимо
1	DSSS (последовательность Баркера)	
2	DSSS (последовательность Баркера)	
5,5	CCK	PBCC
6	OFDM	CCK-OFDM
9		OFDM, CCK-OFDM
11	CCK	PBCC
12	OFDM	CCK-OFDM
18		OFDM, CCK-OFDM
22		PBCC
24	OFDM	CCK-OFDM
33		PBCC
36		OFDM, CCK-OFDM
48		OFDM, CCK-OFDM
54		OFDM, CCK-OFDM

Очевидно, что устройствам стандарта IEEE 802.11g достаточно долго придется работать в одних сетях с оборудованием 802.11b. Также очевидно, что производители в массе своей не будут поддерживать режимы CCK-OFDM и PBSS в силу их необязательности, ведь почти все репаает цена устройства. Поэтому одна из основных проблем нового стандарта — как обеспечить бесконфликтную работу смешанных сетей 802.11b/g.

Основной принцип работы в сетях 802.11 — «слушать, прежде чем вещать». Но устройства 802.11b не способны услышать устройства 802.11g в OFDM-режиме. Ситуация аналогична проблеме скрытых станций: два устройства удалены настолько, что не слышат друг друга и пытаются обратиться к третьему, которое находится в зоне слышимости обоих. Для предотвращения конфликтов в подобной ситуации в 802.11 введен защитный механизм, предусматривающий перед началом информационного обмена передачу короткого кадра «запрос на передачу» (RTS) и получение кадра подтверждения «можно передавать» (CTS). Механизм RTS/CTS применим и к смешанным сетям 802.11b/g. Естественно, эти кадры должны транслироваться в режиме CCK, который обязаны понимать все устройства.

Однако защитный механизм существенно снижает пропускную способность сети. Так, при физической скорости 54 Мбит/с потолок пропускной способности гомогенной сети 802.11g (с учетом всей служебной и управляющей информации) около 32 Мбит/с, а реальные показатели оборудования — на уровне 24 Мбит/с. Если же сеть смешанная, то защитный механизм RTS/CTS понизит пропускную способность до 12 Мбит/с. Это практически вдвое превышает пропускную способность однородной сети 802.11b (~6 Мбит/с), но ведь всегда хочется большего. Поэтому вместо механизма RTS/CTS можно использовать только кадры CTS, предшествующие каждому OFDM-кадру. В результате пропускная способность несколько повысится — до 14,5 Мбит/с. Однако этот механизм неприемлем, если не все устройства сети находятся в зоне слышимости друг друга (пресловутая проблема «скрытой станции»).

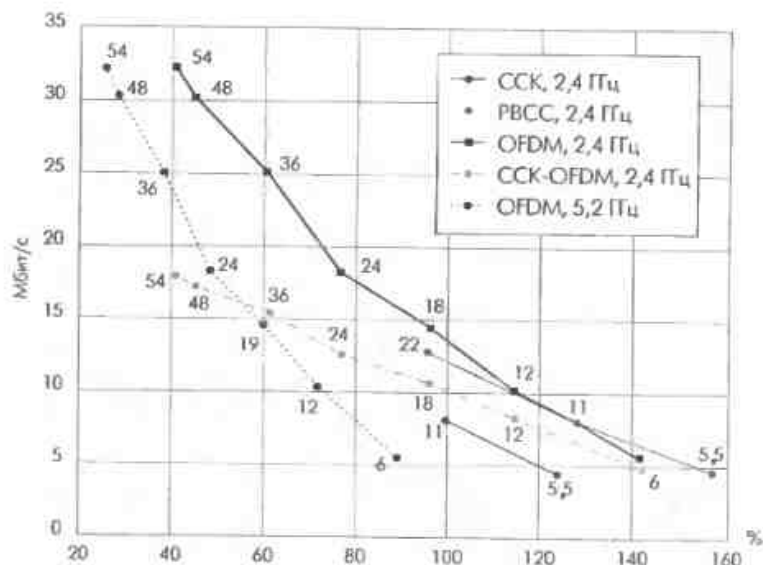


Рис. 10.20. Зависимость скорости передачи от расстояния для различных технологий передачи. Расстояние приведено в процентах, 100% — дальность передачи с модуляцией ССК на скорости 11 Мбит/с

Видимо, поэтому производители ИС для сетей 802.11 разрабатывают специальные методы, способные в рамках действующих стандартов повысить скорость передачи. Так, компания Atheros для стандартов 802.11a и g предложила так называемый режим Turbo Mode,

позволяющий удвоить номинальную скорость до 108 Мбит/с за счет передачи информации одновременно по двум каналам. Для поддержки Turbo Mode компания выпустила специальный чипсет AR5001X+, отличающийся от AR5001X модифицированным процессором AR5212.

Корпорация Intersil пошла другим путем. В апреле она представила свою технологию PRISM Nitro, включающую два основных элемента: защитный механизм и групповую передачу OFDM-кадров [67]. Защитный механизм не содержит ничего принципиально нового и подразумевает передачу перед каждым OFDM-кадром кадра CTS. Групповая же передача OFDM-кадров способна, по мнению специалистов компании, существенно повысить пропускную способность как смешанной 802.11b/g сети, так и однородной.

В случае смешанной сети предлагается каждому устройству предоставлять в трафике примерно равный временной интервал. Действительно, для передачи ССК-кадра со скоростью 11 Мбит/с требуется примерно столько же времени, сколько для передачи шести OFDM-кадров со скоростью 54 Мбит/с (с учетом всех накладных расходов). Если устройства 802.11b и g поочередно передают одинаковый объем информации, на передачу, например, пакетов с информационным полем 1500 байт двум устройствам потребуется 2143 мкс (рис. 10.21).

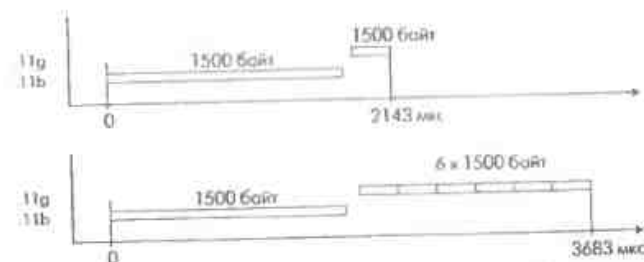


Рис. 10.21. Групповая передача OFDM-пакетов по технологии PRISM Nitro в смешанной сети

Если же каждому устройству для трансляции выделить равные временные интервалы, устройство 802.11g передаст шесть пакетов (9000 байт) — всего 10 500 байт за 3683 мкс. В первом случае пропускная способность сети составит 11,2 Мбит/с, во втором — 22,8 Мбит/с: выигрыш — более чем в 2 раза. В случае однородной 802.11g-сети групповая передача пакетов также дает выигрыш за счет того, что внутри группы между пакетами не требуется выставлять кадр CTS и выжидать межкадровый интервал. Необходим только короткий кадр подтверждения приема АСК (рис. 10.22).



Рис. 10.22. Групповая передача OFDM-пакетов по технологии PRISM Nitro в однородной сети

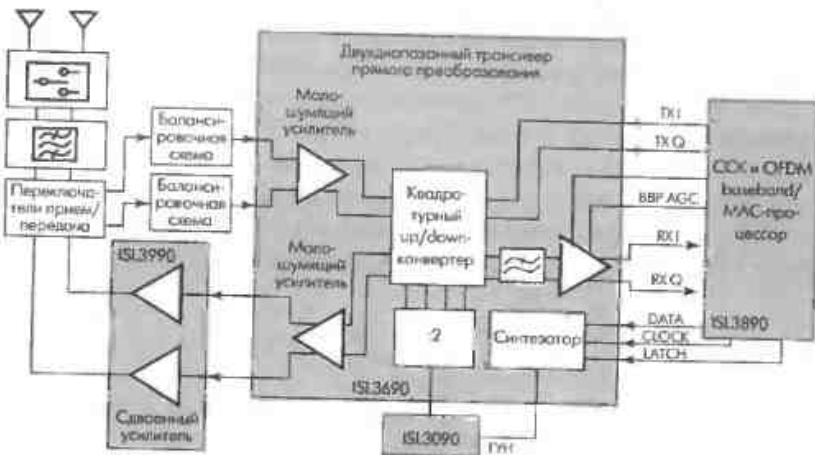
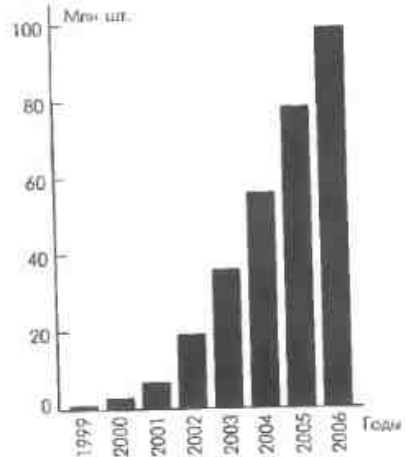


Рис. 10.23. Чипсет PRISM Duette

Технология PRISM Nitro реализуется на уровне системного программного обеспечения. Она специально разрабатывалась для применения совместно с чипсетами PRISM Duette и GT. Ее создатели утверждают, что она полностью соответствует требованиям спецификации IEEE 802.11g. PRISM Nitro была, в частности, использована в маршрутизаторе CONNECT2AIR и сетевых картах компании Fujitsu Siemens Computers. Отметим, что эта компания первой применила новейший тогда процессор фирмы Intersil для точек доступа/маршрутизаторов беспроводных сетей ISL3893. Этот процессор, построенный на базе микропроцессорного ядра ARM9, реализует функции как сетевого процессора беспроводной сети, так и сети Ethernet. Он предназначен для работы совместно с чипсетами PRISM GT и PRISM Duette.

Рис. 10.24. Динамика рынка устройств для сетей IEEE 802.11. По материалам компании IC Insights



10.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g

Устройства IEEE 802.11g с 2002 г. производят такие компании, как Buffalo Technologies, Linksys (вошла в Cisco Systems), D-Link, Apple. Позднее к ним присоединились фирмы Netgear, Belkin, Actiontec, Proxim и многие другие. Такую возможность им предоставили производители наборов микросхем для 802.11g (прежде всего компании Intersil, Atheros Communications, Broadcom). Лидером в данной области выступает компания Intersil, продуманная в 2002 г. компонентов для WLAN на 106 млн долларов. Однако наиболее динамичной корпорацией в этой области выступает Broadcom — первый свой чипсет для 802.11b она представила в июле 2002 г., а в ноябре уже объявила о серийном производстве чипсетов 802.11g. К марту 2003 г. Broadcom продала 1,3 млн чипсетов.

Столь высокие темпы освоения производства изделий IEEE 802.11g продиктованы быстрым ростом рынка этих устройств (рис. 10.24). В 2002 г. продано, по разным оценкам, 18–19 млн чипсетов для беспроводных сетей (практически все — стандарта IEEE 802.11b с пятипроцентным вкраплением 802.11a), в 2003 г. аналитики компании Forward Concepts прогнозировали объем продаж на уровне 30 млн комплектов ИС (на 70% больше!) [47]. Эксперты компании IC Insights предсказывают, что если к концу 2003 г. объем рынка оборудования для беспроводных сетей составит 4,1 млрд долларов, то к 2006 г. он вырастет до 9,3 млрд. Стремительно падает и цена чипсетов —

она уже ниже 10 долларов. Несмотря на это, объем продаж ИС для беспроводных сетей возрастет: если в 2002 г. он составлял 471 млн долларов, к 2006 г. он может превысить миллиардную отметку.

Первым набором микросхем для устройств IEEE 802.11g компании Broadcom стал чипсет для абонентских устройств BCM94306. Он входит в состав большого семейства продуктов компании для беспроводных сетей AirForce. Чипсет включает две ИС – baseband/MAC-процессор BCM4306 и однокристалльный радиомодуль BCM2050 (рис. 10.25).

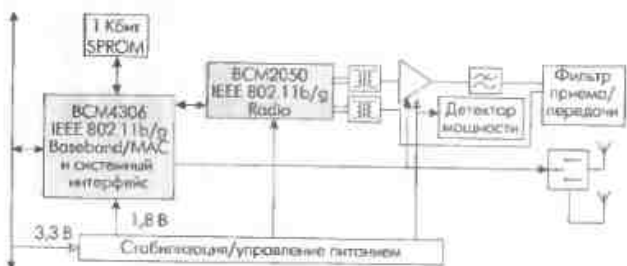


Рис. 10.25. Построение абонентского устройства 802.11g на базе чипсета BCM94306

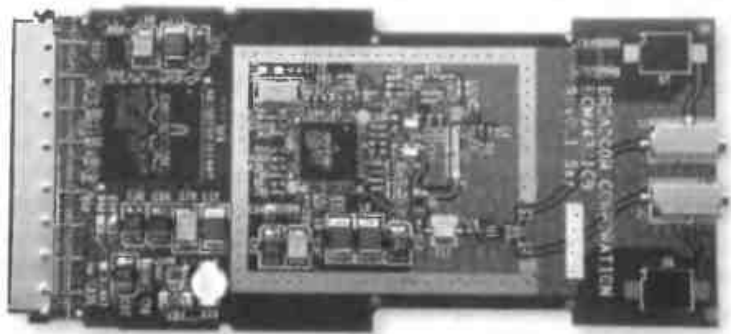


Рис. 10.26. Сетевая абонентская карта BCM94306CB стандарта 802.11b/g в формате CardBus компании Broadcom

Процессор поддерживает интерфейс к шинам PCI/PCMCIA, а также асинхронный последовательный интерфейс для коммутации с микросхемами, обеспечивающие связь посредством протоколов Bluetooth и GPRS (у компании Broadcom есть для этого однокристалльные решения). Отметим, что в семейство AirForce входит широкий спектр продуктов – как абонентские устройства (рис. 10.26) различного исполнения (CardBus, Mini PCI, USB и др.), так и точки досту-

па/маршрутизаторы с поддержкой высокоскоростных проводных интерфейсов [45].

Практически одновременно с компанией Broadcom к производству микросхем для устройств 802.11g приступили корпорации Intersil и Atheros Communications. Intersil выпустила чипсеты PRISM Duette (802.11a/b/g) (рис. 10.23) и PRISM GT (802.11b/g). Компания Atheros представила на рынок чипсет AR5001X Combo с поддержкой 802.11a/b/g. В марте 2002 г. это было первое промышленное решение «три в одном» (рис. 10.27), поскольку PRISM Duette компания Intersil анонсировала в октябре 2002 г.

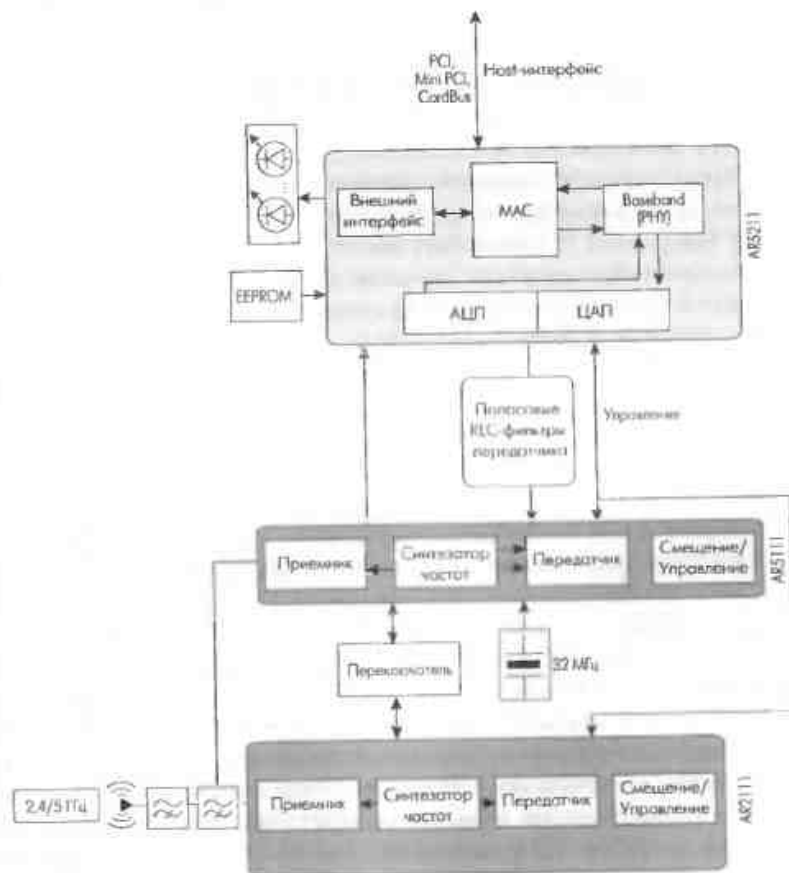


Рис. 10.27. Чипсет AR5001X Combo с поддержкой 802.11a/b/g компании Atheros

На базе многочисленных сегодня предложений от разработчиков элементной базы и OEM-модулей создано множество устройств — как для сетей IEEE 802.11b/g, так и для сетей IEEE 802.11a/b/g. Причем в последнее время появились серийные устройства с поддержкой агрегатной скорости 108 Мбит/с и использованием антенной технологии MIMO — предвестники грядущего стандарта IEEE 802.11n. Характерный пример — сетевой адаптер DWL-G650M Wireless MIMO Cardbus компании D-Link. Он строится на основе чипсета AGN300 фирмы Airgo Networks, в состав которого входят однокристалльный MAC- и baseband-процессор (AGN303BB) и два однокристалльных двухдиапазонных (2,4/5 ГГц) трансивера (AGN301RF и AGN302RF).

10.9. Проект стандарта IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11n предназначен для дальнейшего расширения диапазона скорости передачи данных — до 100 Мбит/с и выше. В целом же он основывается на рассмотренном выше стандарте (дополнении) IEEE 802.11a, поскольку именно в нем описана технология OFDM. Увеличение скорости передачи данных в проекте IEEE 802.11n базируется на двух физических принципах — удвоении полосы пропускания канала, с 20 до 40 МГц, и введении дополнительных антенных каналов приема-передачи (технология многоканальных антенных систем MIMO).

История развития проекта IEEE 802.11n — это история умения договариваться. Работы по созданию будущего стандарта IEEE 802.11n официально начались 11 сентября 2002 г., через год образовалась целевая группа TGn. Весной 2005 г. ситуация с выбором окончательного варианта зашла в тупик. Входящие в TGn компании фактически разделились на два примерно равных лагеря — WWiSE (World-Wide Spectrum Efficiency) и TGn Sync (и еще небольшая группа MITMOT). Долгое время ни один из альтернативных вариантов не мог набрать необходимые для его утверждения 75% голосов (заметим, открытого голосования). Однако уже к осени 2005 г. противоборствующим кланам удалось договориться и создать объединенное предложение, которое учло интересы всех. В результате в январе 2006 г. на регулярной конференции на Гавайях были утверждены устраивающие всех документы [61, 62] (описания физического и MAC-уровней нового стандарта), которые войдут в предварительный (draft) стандарт IEEE 802.11n. Если все пойдет по плану, в окончательном виде он должен быть опубликован не позднее апреля 2007 г. Поэтому

уже правомерно рассматривать основные принципы проекта IEEE 802.11n, основываясь на предварительных документах.

10.10. Отличия физического уровня

10.10.1. Каналы и режимы передачи

Проект IEEE 802.11n допускает как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц (как и всех предшествующих стандартов IEEE 802.11, включая IEEE 802.11a), так и расширенные до 40 МГц. Поскольку каналы шириной 40 МГц приемлемы не для всех стран, противореча национальной политике распределения частотных ресурсов, то их применение — это опциональная (необязательная) возможность. Собственно, введение обязательной поддержки 40-МГц каналов и было одним из камней преткновения в противостоянии групп WWiSE и TGn Sync.

Проект IEEE 802.11n предусматривает поддержку как традиционных режимов передачи (как в IEEE 802.11a), так и режимов с высокой пропускной способностью (HT — High Throughput). В традиционных (L — Legacy) режимах число поднесущих не изменено. В HT-режимах оно увеличено: в 20-МГц канале их 56, из них 52 — информационные и 4 пилотные. Только из-за этого скорость возрастает на 8%. Еще один фактор увеличения скорости — понижение допустимой скорости кодирования до 5/6 (т. е. каждые 5 бит исходной последовательности преобразуются в 6 бит закодированной). Опционально предусмотрена возможность двукратного сокращения длительности защитных интервалов GI в OFDM-символах — с 0,8 до 0,4 мкс. В результате скорость возрастает до 65 и 72,2 (опционально) Мбит/с.

Режим 20 МГц — обязательный, для него установлен базовый набор скоростей (табл. 10.3). В 40-МГц каналах поднесущих 114, из них 108 информационных и 6 пилотных. Один лишь этот фактор увеличивает пропускную способность канала на 125%.

Отметим, что традиционный режим также позволяет увеличивать (удваивать) скорость передачи данных. Однако это происходит при непосредственном удвоении полосы пропускания (40 МГц) — фактически происходит передача на двух смежных каналах IEEE 802.11a, используются $52 \times 2 = 104$ поднесущие (из 128 номинальных поднесущих не задействованы частоты с индексами от -5 по 5).

Таблица 10.3. Базовый набор скоростей проекта IEEE 802.11n

Модуляция	Скорость кодирования	Число бит на поднесущую	Кодированных бит на символ	Информационных бит на символ	Скорость передачи данных	
					GI = 0,8 мкс	GI = 0,4 мкс
BPSK	1/2	1	52	26	6,5	7,2
QPSK	1/2	2	104	52	13,0	14,4
QPSK	3/4	2	104	78	19,5	21,7
16-QAM	1/2	4	208	104	26,0	28,9
16-QAM	3/4	4	208	156	39,0	43,3
64-QAM	2/3	6	312	208	52,0	57,8
64-QAM	3/4	6	312	234	58,5	65,0
64-QAM	5/6	6	312	260	65,0	72,2

10.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM

Основное отличие стандарта IEEE 802.11n от его предшественников — появление нескольких антенных каналов в приемнике и передатчике. Обязательный режим подразумевает поддержку двух антенных каналов оборудованием точек доступа (AP) и одного канала — пользовательскими (терминальными) станциями. Всего и у AP, и у терминальной станции может быть до четырех антенных каналов приема-передачи.

Поскольку проектом IEEE 802.11n предусмотрена технология MIMO, изменяется структурная схема передающего и приемного устройств (рис. 10.28). Данные после скремблирования поступают на сверточный кодер (как и в IEEE 802.11a). Если скорость передачи данных превышает 300 Мбит/с, используются два сверточных кодера. В отличие от IEEE 802.11a, поддерживается скорость кодирования 5/6. Кроме того, опционально вместо двоичного сверточного кодера (BCC) предусмотрено применение блочного кодера LDPC (Low density parity check codes).

Дальше различия более серьезные. Кодированный поток битов разбивается на так называемые пространственные (пространственно-разделенные) потоки (spatial streams). Число таких потоков N_{SS} не может быть меньше, чем число антенных каналов в передатчике N_{TX} . Предусмотренный алгоритм распределения по потокам

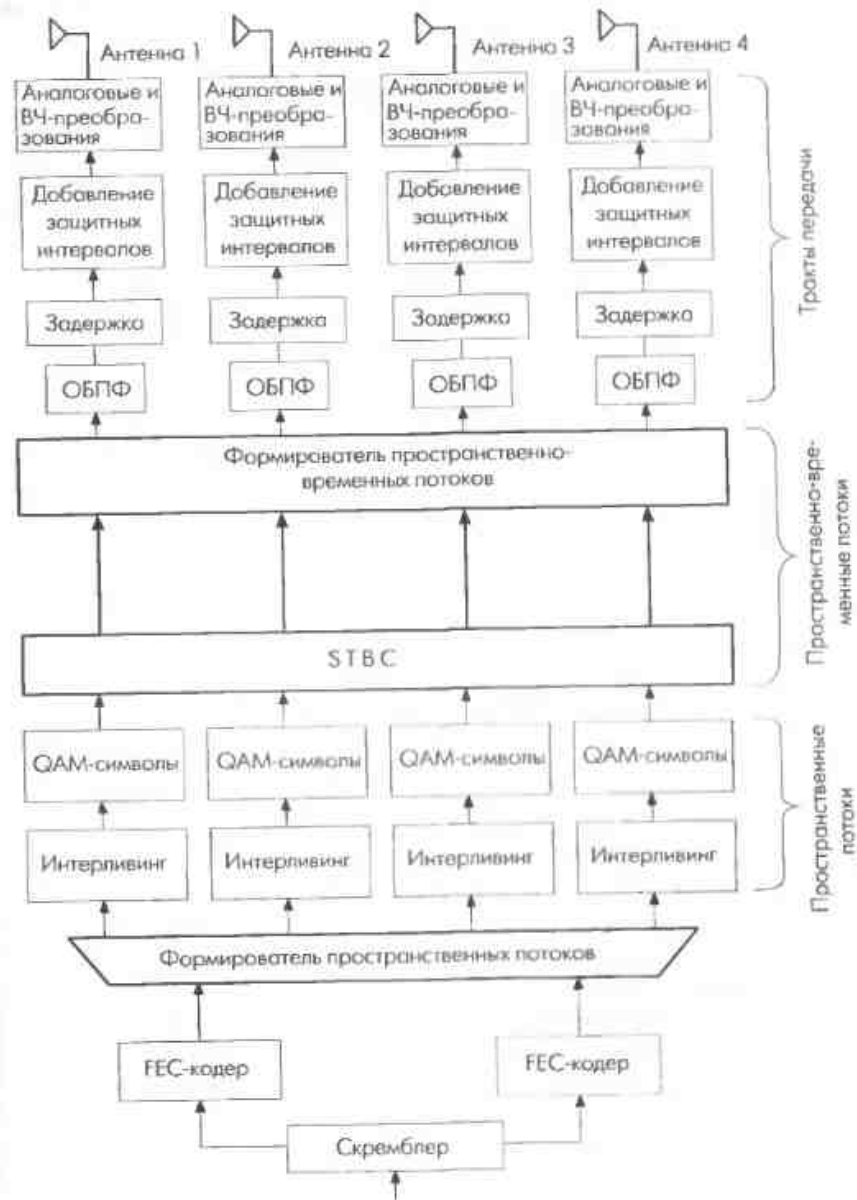


Рис. 10.28. Структура аппаратуры передачи стандарта IEEE 802.11n

прост — входная последовательность разбивается на группы длиной

$$S = \sum_{i_{SS}=0}^{N_{SS}-1} s(i_{SS}),$$

где $s(i_{SS}) = \max(1, N_{BPSC}(i_{SS})/2)$ — число бит, определяющих действительную или мнимую составляющую комплексного модуляционного символа на одной поднесущей, $N_{BPSC}(i_{SS})$ — число бит на поднесущую в одном OFDM-символе. Если в каждом пространственном потоке используется одинаковая схема мультиплексирования, то $S = N_{SS} \cdot \max(1, N_{BPSC}/2)$.

Группы длиной S последовательно (по кругу) распределяются между N_{SS} пространственных потоков. Далее в каждом потоке происходит перемежение битов, аналогично IEEE 802.11a (на первой стадии для перестановок применяется таблица размером 13 строк на $4N_{BPSC}$ столбцов для 20-МГц канала и $18 \times 4N_{BPSC}$ — для 40-МГц канала) (см. раздел 10.6). Если использовано более одного пространственного потока, появляется третья стадия перемежения — частотная ротация. Она описывается выражением

$$r = \{j - [2i_{SS} \bmod 3 + 3 \cdot \text{floor}(i_{SS}/3)] \cdot N_{rot} \cdot N_{BPSC}\} \cdot N_{CBPS},$$

где j — индекс бита после второй стадии перестановок; i_{SS} — номер пространственного канала. Коэффициент N_{rot} принимает значения 11 и 29 для 20- и 40-МГц каналов соответственно.

Применение технологии MIMO преследует две цели — повышение надежности приема/передачи и обеспечение связи по пространственно-разделенным каналам (SDM — Spatial Division Multiplexing). В первом случае используется так называемый пространственно-временной блочный код (STBC — Space Time Block Code), повышение скорости передачи происходит за счет сокращения проверочных последовательностей и уменьшения защитных интервалов. При SDM скорость увеличивается благодаря распараллеливанию потоков транслируемых данных.

Пространственно-временное кодирование [29] подразумевает преобразование одного потока OFDM-символов d_i в два пространственно-временных потока (табл. 10.4, символ * означает комплексное сопряжение: если $x = a + jb$, то $x^* = a - jb$). Поэтому в системах IEEE 802.11n число пространственно-временных N_{STS} должно превышать N_{SS} . Возможны различные сочетания значений N_{STS} и N_{SS} , лишь бы $N_{STS} > N_{SS}$.

После стадии формирования пространственно-временных потоков (если STBC не используется, можно считать, что простран-

ственно-временной поток однозначно соответствует пространственному потоку, $N_{STS} = N_{SS}$), происходит их распределение по антенным каналам. Проект IEEE 802.11n предусматривает несколько схем такого распределения. Наиболее простая — прямое назначение (direct mapping) пространственного потока антенному каналу с одинаковыми номерами, при этом число антенных каналов передатчика $N_{TX} = N_{STS}$.

Таблица 10.4. Пространственно-временное кодирование

	Интервал 1	Интервал 2
Канал 1	d_{2n}	d_{2n+1}^*
Канал 2	$-d_{2n+1}^*$	d_{2n}^*

Если $N_{TX} > N_{STS}$, используются различные схемы пространственного расширения, которые математически описывает выражение

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = [\mathbf{Q}] \times \mathbf{x} = [\mathbf{Q}] \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix},$$

где \mathbf{r} — вектор символов, передаваемых в антенных каналах (длиной N_{TX}); \mathbf{x} — вектор символов в пространственно-временных каналах длиной N_{STS} ; \mathbf{Q} — матрица с N_{TX} строками и N_{STS} столбцами. В схеме прямого назначения \mathbf{Q} — диагональная единичная матрица.

В случае двух пространственно-временных потоков и трех антенных трактов первый поток может передаться через первый и третий антенные тракты, т. е. $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, при $N_{TX} = 3$ и

$N_{STS} = 1$ $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1 \\ & & 1 \end{bmatrix}$. Отметим, что столбцы в матрицах \mathbf{Q} должны быть ортогональными (например, на основе матриц Адамара).

Предусмотрен и режим, когда матрица \mathbf{Q} принимает различные значения для каждой поднесущей k : в рассмотренном случае $N_{TX} = 3$ и $N_{STS} = 2$;

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В антенных каналах 2, 3 и 4-я информация передается с временной задержкой (относительно канала 1) в 400, 200 и 600 нс соответ-

ственно. Такой фазовый сдвиг необходим, чтобы избежать произвольного формирования стабильной диаграммы направленности передающей антенной системы, а это может произойти, например, при синфазном или противофазном излучении.

Однако в проекте IEEE 802.11n предусмотрен и так называемый режим формирования луча (beamforming). В этом режиме матрица Q формируется передатчиком на основе информации о состоянии канала связи между ним и выбранным приемником. Вектор принятого приемником совокупного по всем антенным каналам сигнала можно записать как $y = [y_1, \dots, y_{RX}]^T$. Вектор передаваемого сигнала $r = [r_1, \dots, r_{TX}]^T$. Тогда $y = H \times r + n$, где n — вектор шума в канале; H — матрица (размерности N_{RX}, N_{TX}) состояния канала. Поскольку $r = Q \times x$, то $y = H \times Q \times x + n$.

Следовательно, для компенсации задержек и затуханий в канале, описываемых матрицей H , необходимо вычислить и применить соответствующую матрицу Q . Для этого приемник вычисляет и транслирует передатчику либо матрицу состояния канала H , либо уже подготовленные матрицы Q . В качестве тестовой последовательности (заранее известной передатчику) выступают преамбулы пакетов физического уровня (точнее — длинные подстроочные последовательности режима HT, HT-LTF) либо специальные тестовые пакеты «прослушивания» канала, включая пакеты прослушивания без поля данных.

10.10.3. Структура кадров физического уровня

Проект IEEE 802.11n на физическом уровне предусматривает три структуры кадров — традиционную (совпадающую с IEEE 802.11a/g), смешанную и так называемое Зеленое поле (Green Field) (рис. 10.29). Эти структуры соответствуют одноименным режимам работы. Последние два из них называют скоростными (HT).

Смешанный режим (MM — mixed mode) предназначен для совместимости сетей IEEE 802.11a/g и IEEE 802.11n — традиционные устройства распознают присутствие своих высокоскоростных собратьев и определяют режим их передачи (например, длительность захвата канала), что позволяет предотвратить коллизии, особенно в случае скрытых станций. Для этого в структуре пакетов типа MM присутствуют как традиционные поля — короткая и длинная подстроочные последовательности (L-STF и L-LTF) и заголовок SIGNAL (L-SIG), так и поля, необходимые для HT-режима. К последним отно-

сятся управляющее поле HT-SIGNAL (HT-SIG), а также короткая и длинные подстроочные последовательности (HT-STF и HT-LTF). Временная задержка между каналами добавляется именно перед HT-полями.

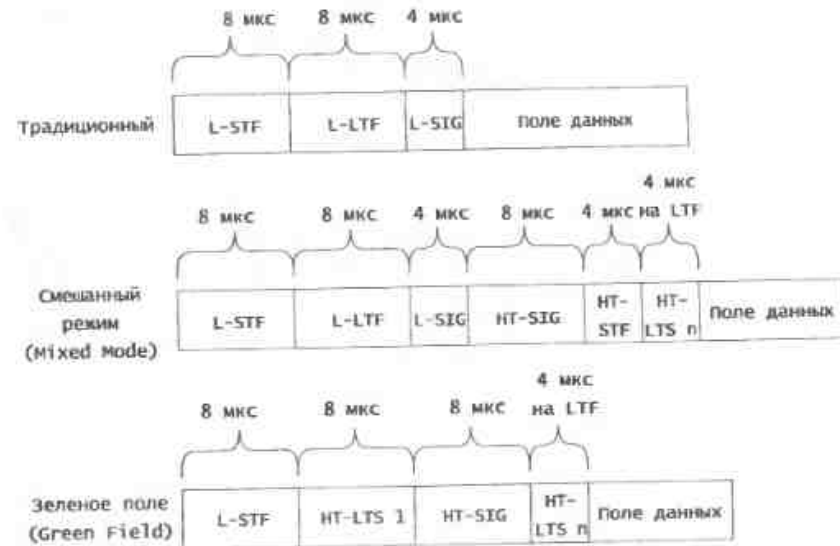


Рис. 10.29. Пакеты физического уровня стандарта IEEE 802.11n

Режим Зеленого поля (GF) (точнее — чистого, неагрессивного поля) позволяет передавать данные наиболее эффективно. В GF-кадрах присутствуют только HT-поля, и традиционные приемники IEEE 802.11 такие посылки не воспримут. Поэтому данный режим опционален и может использоваться, только если все станции сети поддерживают IEEE 802.11n.

Управляющее поле HT-SIGNAL состоит из двух частей по 24 бит каждая. Эти части кодируются (со скоростью 1/2), подвергаются перемежению и прочей обработке, как и в случае IEEE 802.11a. Поднесущие модулируются посредством BPSK, только модуляционные символы смещены на 90° относительно традиционного случая (приведенного на рис. 10.13), т. е. на диаграмме Грея значения битов 0 и 1 соответствуют -1 и 1 на квадратурной (мнимой) оси Q . В результате поле HT-SIGNAL занимает 2 OFDM-символа.

Информация, передаваемая в HT-SIGNAL, — номер схемы кодирования/модуляции (MCS), признак ширины канала (20/40 МГц), длина поля данных, признак оценки канала smoothing (интеграль-

ная или на каждой поднесущей отдельно), признак пакетов прослушивания канала (sounding), признак объединения MAC-пакетов (aggregation), номер схемы STBC-кодирования, указатель типа кодирования (BCC/LDPC), признак короткого защитного интервала в OFDM-символах (short GI), число дополнительных длинных подстроечных последовательностей (N HT-LTF), контрольная сумма CRC и разграничительные 6 бит (Tail) (рис. 10.30).

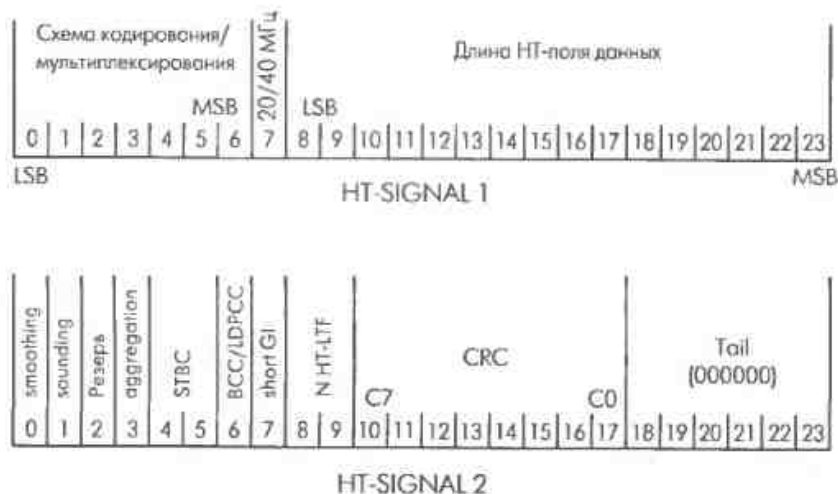


Рис. 10.30. Поле SIGNAL заголовка пакета физического уровня стандарта IEEE 802.11n

Короткая подстроечная последовательность аналогична традиционной (с поправкой на число используемых поднесущих). Длинные подстроечные последовательности служат для оценки каналов передачи (для каждого антенного тракта), поэтому их число не может быть меньше, чем число пространственно-временных потоков NSTS. Кроме того, HT-LTF — это механизм прослушивания канала, поэтому в кадре может быть больше HT-LTF, чем необходимо для передачи поля данных именно этого кадра (т. е. больше, чем в данный момент используется пространственно-временных каналов). Эти дополнительные последовательности предназначены для оценки каналов, которые передатчик предполагает использовать. Физически вышесказанное означает, что если данные в кадре передаются, например, через антенные тракты 1 и 2, то в них используют длинные подстроечные последовательности HT-LTF1 и HT-LTF2, а одновременно в недействующих антенных трактах 3 и 4 могут транс-

лироваться последовательности HT-LTF3 и HT-LTF4 для оценки соответствующих каналов. Длительность HT-LTF — 4 мкс, в режиме GF первая HT-LTF вдвое длиннее.

В результате применения дополнительных антенных трактов, а также 20- и 40-МГц каналов число возможных скоростей передачи и соответствующих им схем модуляции/кодирования существенно возрастает по отношению к базовому набору (см. табл. 10.3). Причем возможны как симметричные схемы модуляции (одинаковые в каждом пространственном потоке), так и несимметричные (вид модуляции в каждом потоке различен). Проект описывает по 32 симметричные схемы для 20- и 40-МГц каналов (для HT-режимов) и по 44 асимметричные схемы. В результате для 20-МГц каналов предусмотрены скорости до 288,9 и 600 Мбит/с — для 40-МГц каналов.

10.10.4. Особенности MAC-уровня

Повышение скорости передачи возможно не только за счет изменений на физическом уровне. MAC-уровень в проекте IEEE 802.11n также модернизирован. Одна из важнейших особенностей IEEE 802.11n — возможность объединения (агрегирования) нескольких MAC-пакетов (MPDU) в один пакет физического уровня PSDU (A-MPDU) (рис. 10.31). У такого объединенного пакета может быть только один адрес получателя. При этом повышается скорость передачи данных, поскольку сокращается удельный объем служебной информации (заголовки и преамбулы пакетов физического уровня). Объединение пакетов — это обязательное требование, и только те MPDU, которые требуют индивидуального подтверждения приема (Ack), могут передаваться как отдельные пакеты. Более того, один MPDU может агрегировать несколько пакетов MSDU (MAC service data unit), принадлежащих различным сервисным потокам (различным приложениям) и обладающих различными требованиями к качеству предоставления услуг (QoS), лишь бы у них был единый адрес приемника. В результате формируется объединенный MAC-пакет A-MSDU (см. рис. 10.31).

Для подтверждения приема пакетов физического уровня PSDU используется специальный пакет блочного подтверждения (Block Acknowledge — BA), описанный в недавно принятом стандарте IEEE 802.11e (посвящен обеспечению QoS). Однако в IEEE 802.11n применяют «сжатые» BA — в этом пакете предусмотренное стандартом IEEE 802.11e поле подтверждения размером 128 байт сокращено до 8 байт, причем каждый бит в этом поле подтверждает прием отдельного MSDU (рис. 10.32). Более того, необходимый запрос подтверждения (отдель-

ный пакет BAR — BA request) может не использоваться, вместо этого достаточно задать определенный тип политики подтверждений. По утверждениям разработчиков, приведенный на рис. 10.32 механизм обмена (объединенный пакет и блок подтверждения) более чем в 2,5 раза эффективнее, чем традиционный «данные-подтверждение».

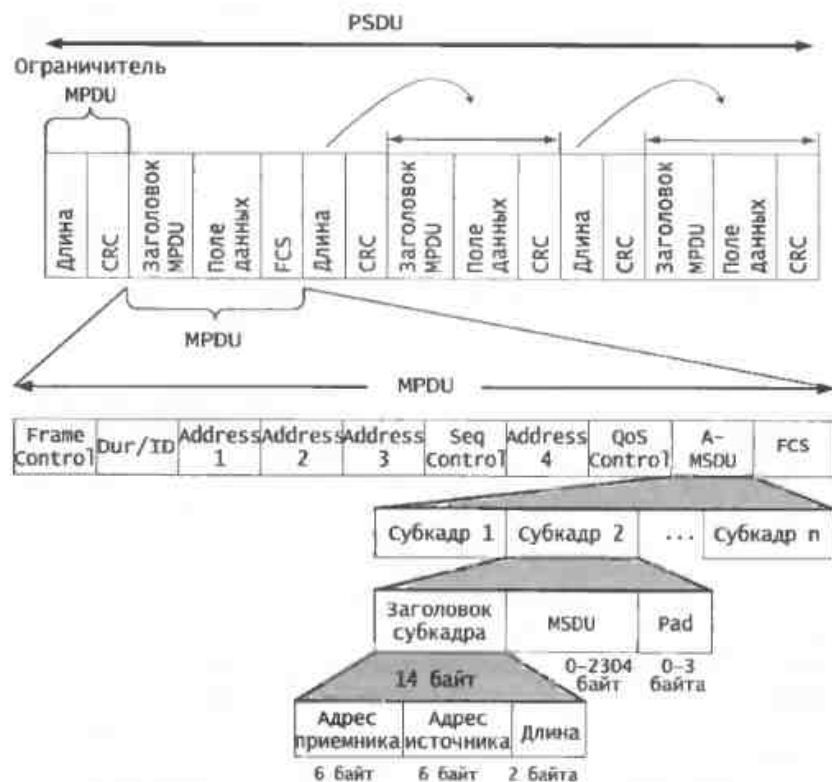


Рис. 10.31. Интегрированные заголовки MAC-уровня стандарт IEEE 802.11n

Важная особенность проекта IEEE 802.11n — режим PSMP (Power Save Multi-Poll) — энергосберегающий множественный опрос. Он похож на стандартный режим централизованного распределения ресурсов PCF — управляющая станция AP транслирует специальный управляющий пакет PSMP, в котором для каждой станции (из тех, которым разрешен режим PSMP) назначается время и длительность приема и передачи (нисходящего и восходящего соединений) в интервале обслуживания (цикле повторения приема-передачи). Причем

длительность интервала обслуживания для каждой станции может быть различной. Для подтверждения приема в режиме PSMP используются специальные пакеты подтверждения (MTBA), следующие немедленно за переданными агрегированными пакетами данных. Энергоэкономия достигается благодаря тому, что станции знают, когда им необходимо активизироваться, и могут выключить свои энергосиловые блоки на время бездействия.

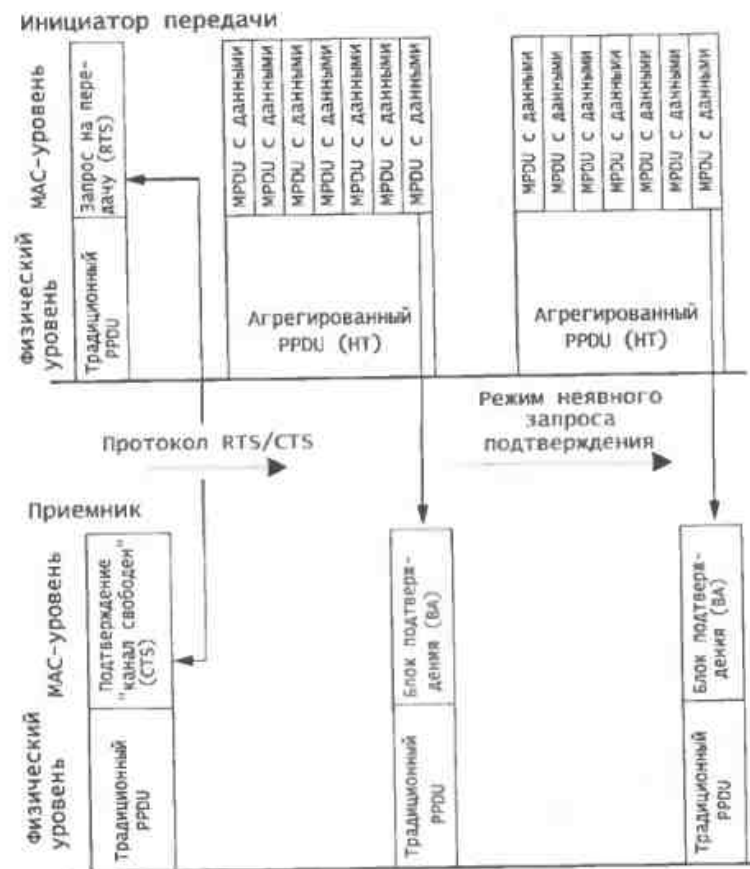


Рис. 10.32. Передача посредством агрегированных пакетов и блоков подтверждений

Особенность данного режима — его гибкость. В рамках одного цикла PSMP управляющая станция может передавать дополнительные пакеты PSMP (sub-PSMP) — это режим мультифазного PSMP.

В чем его удобство? Например, какая-либо станция не успела передать данные в отведенный для нее интервал (рис. 10.33). Тогда в конце этого интервала она посылает AP специальный пакет (запрос RR) с указанием необходимых этой станции дополнительных ресурсов. Если есть возможность, AP отправляет в ответ пакет sub-PSMP, в котором данной станции выделен дополнительный интервал передачи. Другой случай — потеря данных. Если передающая станция не получила подтверждения приема, AP также может предоставить ей дополнительные ресурсы для повторной передачи посредством sub-PSMP.

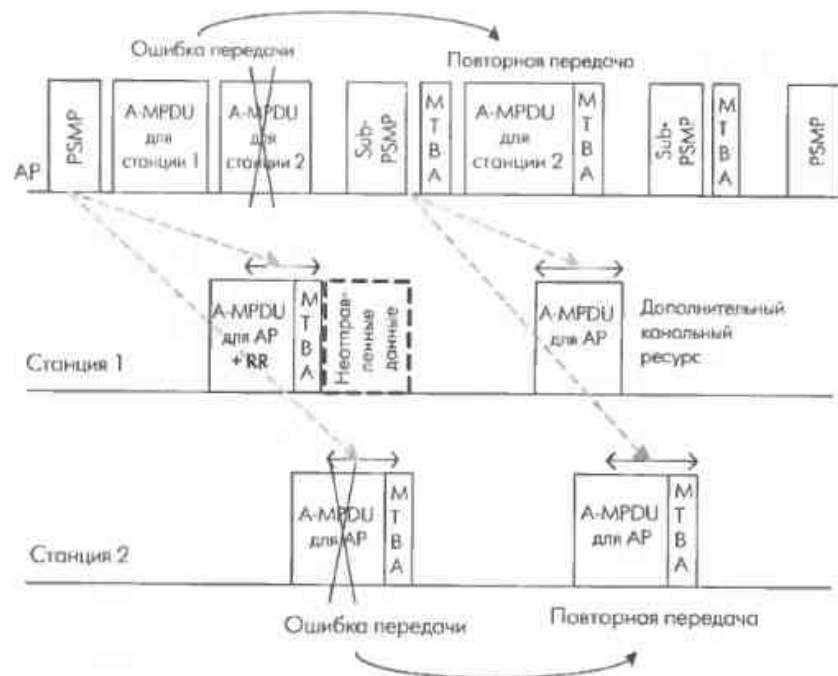


Рис. 10.33. Выделение дополнительного окна передачи для доставки информации и повторной отправки данных в режиме мультифазового PSMP

Не менее интересная особенность IEEE 802.11n — режим изменения направления обмена соединением. Пусть станция А передает данные станции Б. Оставаясь в рамках того же соединения, т. е. без дополнительных процедур доступа к каналу, возможно изменить направление передачи — от станции Б к станции А, а затем вновь передать права трансляции станции А.

Разумеется, помимо перечисленных особенностей, MAC-протокол проекта IEEE 802.11n включает поддержку всех изменений физического уровня. Он определяет специальные форматы пакетов калибровки канала передачи, выбора антенны, измерения характеристик канала и передачи матриц параметров канала, формирования диаграмм направленности и т. п. Предусмотрено применение сокращенных до 2 мкс межкадровых интервалов (RIFS) и т. д.

10.10.5. Элементная база для 802.11n

Производители элементной базы и аппаратуры уже выпускают WiFi-продукты с отдельными возможностями IEEE 802.11n. Едва ли не первой в этом направлении выступила компания Airgo Networks (www.airgonetworks.com), выпускающая чипсет AGN300 для поддержки MIMO-опции в стандартах IEEE 802.11 a/b/g (пробраз 802.11n). В состав чипсета входят однокристалльный MAC- и baseband-процессор (AGN303BB) и два однокристалльных двухдиапазонных (2,4/5 ГГц) трансивера (AGN301RF и AGN302RF).

Одним из первых производителей пред-802.11n чипсетов стала и израильская фирма Metalink Broadband (www.MetalinkBB.com), выпустившая чипсет WLANPlus в составе сдвоенного трансивера MtW8150 и MAC- и baseband-процессора MtW8170 (рис. 10.34). В MtW8150 на одном кристалле интегрированы два цифровых трансивера для частотного диапазона 4,9–5,9 ГГц с полосой пропускания 20/40 МГц (рис. 10.35). Трансиверы используют принцип прямого преобразования (т. е. с нулевой промежуточной частотой), а потому не пугаются во внешних ПАВ-фильтрах. Поддержка квадратурная модуляция, вплоть до 64-QAM. MtW8150 можно каскадировать для поддержки систем более чем с двумя антенными каналами (например, 4 × 4). Чип размером 11 × 11 мм выполнен по Si-Ge-технологии, напряжение питания 3 В.

СБИС MtW8170 поддерживает физический и MAC-уровни системы связи. Она обеспечивает обратную совместимость с IEEE 802.11a, а также скорости передачи данных до 243 и 135 Мбит/с в 40- и 20-МГц каналах соответственно. Одной СБИС MtW8170 достаточно для поддержки MIMO-конфигураций 2 × 2 и 2 × 3.

Кроме упомянутых компаний, к производству чипсетов для поддержки будущего стандарта IEEE 802.11n приступили такие фирмы, как Atheros Communications (чипсет AR5008) и Broadcom (чипсет INTENSI-FI). В состав последнего входит MAC- и baseband-процессор BCM4321 и трансивер BCM2055 (рис. 10.36), предназначенные для работы в диапазонах 2,4–2,5 и 4,9–5,85 ГГц.

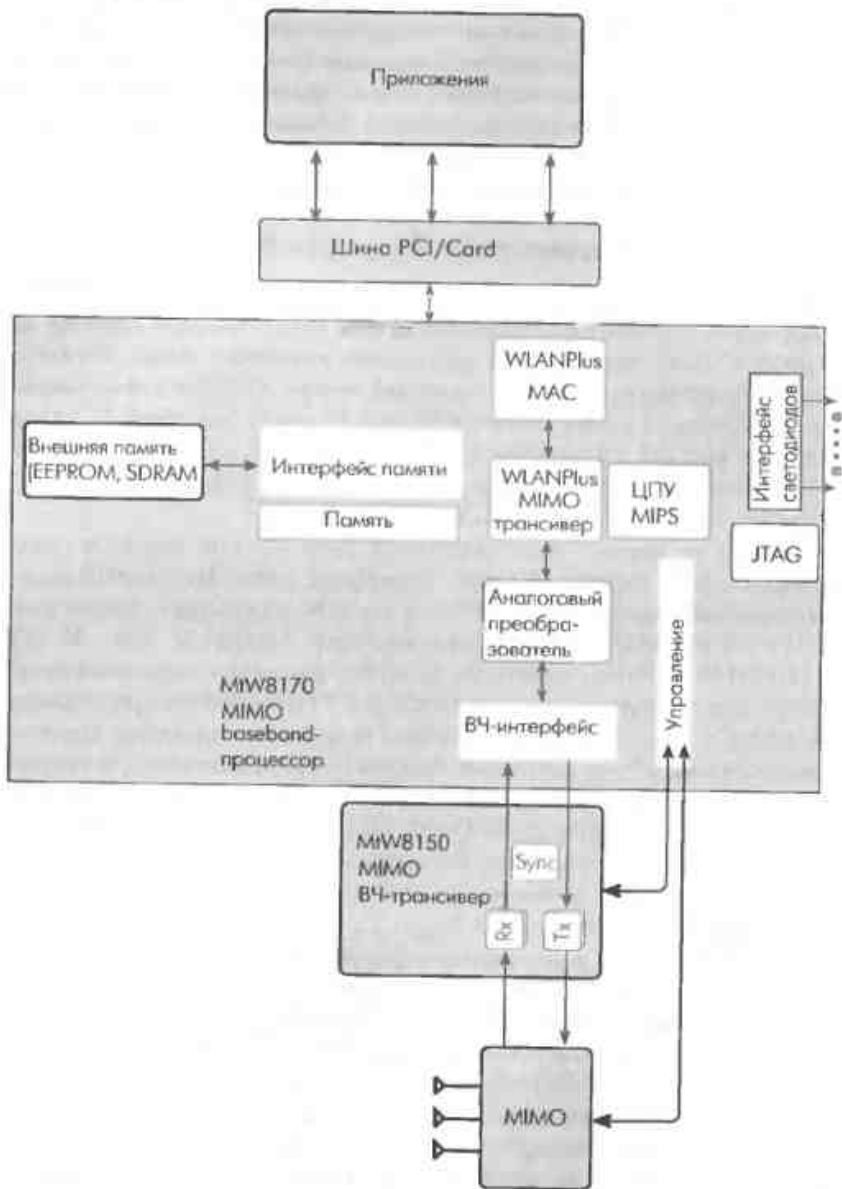


Рис. 10.34. Чипсет WLANPlus компании Metalink

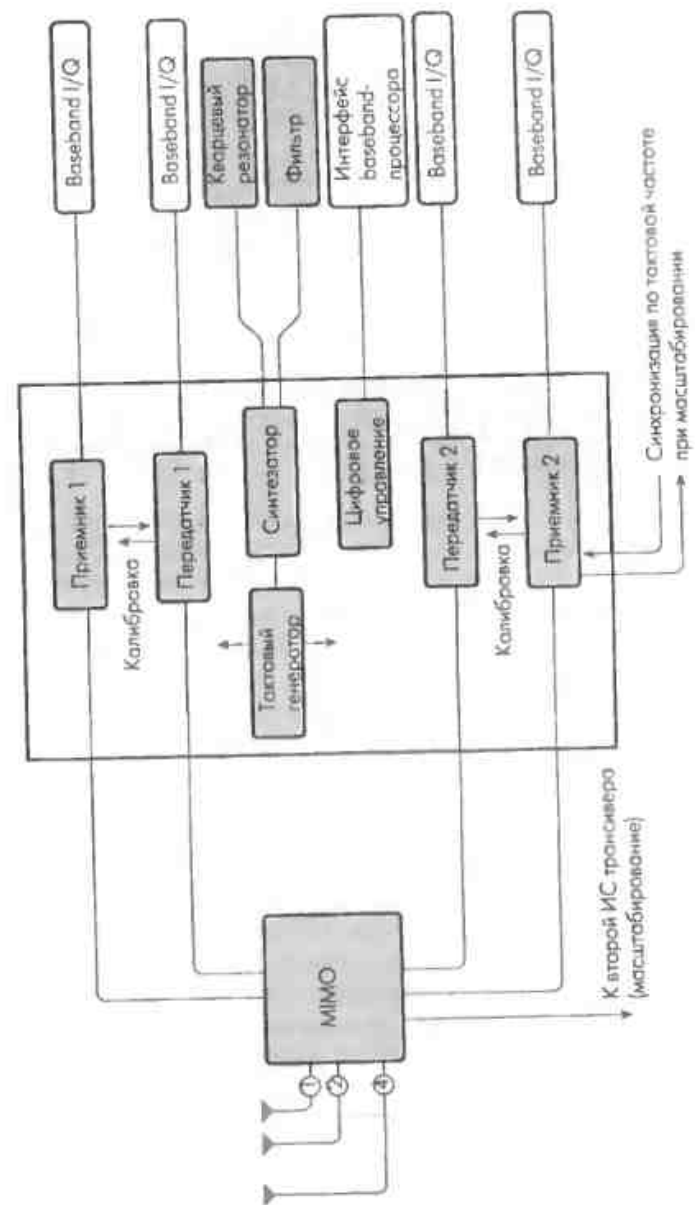


Рис. 10.35. Сдвоенный трансивер прямого преобразования Miw8150 компании Metalink

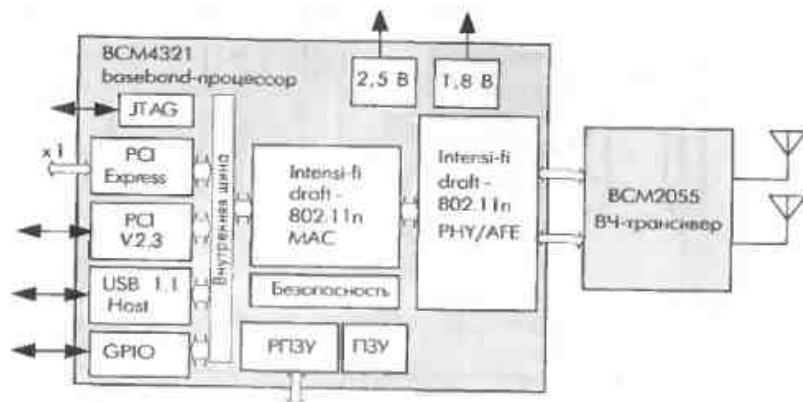


Рис. 10.36. Чипсет INTENSI-F1 (трансивер и baseband-процессор) компании Broadcom

ГЛАВА 11

СТАНДАРТ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА IEEE 802.16-2004

11.1. Предыстория стандарта IEEE 802.16

11.1.1. Системы MMDS и LMDS/MVDS

Системы беспроводного широкополосного доступа регионального (городского) масштаба своим массовым развитием изначально обязаны телевидению, которое требовало все новых и более высокоскоростных средств доставки ТВ-трафика до зрителей. Кабельные системы со своими задачами справлялись не везде, и в 1970 г. Федеральная комиссия связи (FCC) США представила, по-видимому, первую беспроводную многоточечную систему распределения MDS (Multipoint Distribution System). Она предусматривала вещание в радиусе порядка 30 миль от передатчика в диапазоне 2,1–2,7 ГГц. Эксперимент не удался — стоимость оборудования оказалась неконкурентоспособной с кабельным и спутниковым ТВ.

Через четверть века на смену MDS пришли новые системы MMDS (Multichannel (или Microwave) Multipoint Distribution Service) — многоканальные (микроволновые) многоточечные распределительные системы. Они позволяют работать в диапазоне 2,5–2,7 ГГц в зоне радиусом до 35 миль (50–60 км — фактически зона прямой видимости). При этом мощность передатчика базовой станции, как правило, не превышает 100 Вт (до 1 кВт) — сравните с передатчиками 10–50 кВт на ретрансляторах обычных аналоговых телевизионных сетей. В оборудовании MMDS используется квадратурная амплитудная модуляция — от четырехпозиционной QPSK (2 бита на модуляционный символ) до 256-позиционной QAM (8 бит на символ). Поэтому скорости передачи данных в MMDS могут достигать очень больших значений при соответствующей ширине канала. Так, в стандартном телевизионном канале 8 МГц возможна скорость до 64 Мбит/с, но лишь

теоретически. Отметим, что концепция систем MMDS разрабатывалась для трансляции телевизионных программ, поэтому она принципиально однонаправленная. В последние годы стали появляться сообщения об оборудовании для двунаправленной работы — производители стали добавлять обратный канал, как правило, с гораздо меньшей (в 4–8 раз) полосой пропускания, что позволяет использовать системы MMDS и для обмена данными (доступ в Интернет, интерактивное ТВ, мосты между локальными сетями и т. д.).

Однако сети MMDS так и не стали массовыми — к 2000 г. в США они насчитывали около 20 тыс. абонентов [71]. Причина очевидна: оборудование слишком дорого по сравнению с альтернативными решениями (кабельное телевидение, xDSL-модемы и т. д.). Следующим шагом в области систем широкополосного доступа стало появление концепции Local Multipoint Distribution Service (LMDS) — локальная многоточечная распределительная система. Ее испытания прошли в 1992 г. в Нью-Йорке. В 1998 г. FCC объявила о начале лицензирования LMDS. Первой реально действующей LMDS-системой стала сотовая телевизионная сеть компании Cellular Vision в Нью-Йорке в районе Брайтон-Бич (этот район Бруклина не был охвачен сетью кабельного телевидения).

Изначально LMDS предназначалась для работы в диапазоне 27,5–29,5 ГГц, однако рабочий диапазон зависит от распределения частот в конкретном регионе. В Европе появилась аналогичная система MVDS (Multipoint Video Distribution Systems), ориентированная на диапазон 40,5–42,5 ГГц (диапазон, выделенный в Европе для аналогового ТВ-вещания).

Системы LMDS/MVDS называют сотовым телевидением, поскольку радиус действия каждого ретранслятора невелик — порядка 3–8 км. В системах используют относительно маломощные передатчики — по более десятков ватт в групповых передатчиках (до 100–300 мВт на канал). Кроме того, в миллиметровом диапазоне затухание радиоволн весьма велико. Но с другой стороны, сигналы в этом диапазоне отражаются от препятствий с малыми потерями, что можно эффективно использовать в условиях городской застройки, работая на пересеченных сигналах.

Системы LMDS/MVDS используют те же методы модуляции (QPSK, QAM) и частотные планы (19,5–39 МГц), что и системы спутникового ТВ-вещания. Диапазон их работы определяется наличием свободного частотного ресурса и может быть, например, 10, 24, 31, 38 ГГц. При общей ширине полосы 2 ГГц эти системы позволяют передавать от 96 до 128 аналоговых ТВ-каналов. Сотовая

структура сетей LMDS/MVDS открывает широкие возможности для частотного планирования, включая такие механизмы, как различная поляризация сигналов, применение направленных (секторных) антенн, использование одних и тех же каналов в разных сотах и т. д. Важно отметить, что в современных трансляционных системах твердотельные выходные усилители усиливают сигнал только в активных каналах, а не во всей полосе сразу. Именно это и обуславливает относительно невысокую (сотни милливатт на канал) мощность излучения групповых передатчиков. Для сравнения — в Нью-Йорке при введении системы LMDS в районе Брайтон-Бич использовались выходные усилители на основе ламп бегущей волны мощностью свыше 100 Вт, усиливающие сразу весь рабочий диапазон. Сейчас там 17 базовых станций обеспечивают 48 аналоговых ТВ-каналов (NTSC) [72].

С 2000 г. системы LMDS стали двунаправленными, что открыло перед ними широчайшие возможности для миграции из области ТВ-вещания в зону интерактивных приложений, важнейшее из которых Интернет, а также интерактивное телевидение (Video on Demand). Операторы соответствующих сервисов не замедлили этим воспользоваться. Однако широкому внедрению систем широкополосного доступа мешало отсутствие единого стандарта — аппаратура различных производителей оказывалась несовместимой, специализированная элементная база не могла стать массовой, соответственно цены оставались высокими. Названия MMDS и LMDS/MVDS фактически обозначали только тип сервиса и самые основные функциональные возможности, а не методы практической реализации. Единой технической концепции (методы модуляции, механизмы доступа к каналам и т. п.) не было. Развитие этих систем резко остановилось, многие известные производители (например, корпорации Nortel, ADC) вообще объявили о прекращении выпуска соответствующего оборудования. Решением возникшей проблемы стал стандарт широкополосных региональных сетей IEEE 802.16.

11.1.2. Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004

В августе 1998 г. по инициативе Национальной испытательной лаборатории беспроводных электронных систем Национального института стандартов и технологии США (National Wireless Electronics Systems Testbed of the U.S. National Institute of Standards and Technology) комитет 802 IEEE организовал рабочую группу 802.16. С июля 1999 г. группа приступила к регулярной работе над новым стандар-

том широкополосных городских (региональных) сетей передачи данных (MAN — Metropolitan Access Network) с фиксированным доступом. Соответственно новый стандарт получил название WirelessMAN. Изначально деятельность велась в трех направлениях — разработка стандартов для диапазонов 10–66 ГГц (первоначально обозначался 802.16.1) и 2–11 ГГц (802.16.3), а также стандарта, регламентирующего совместную работу различных систем широкополосного беспроводного вещания (802.16.2).

Уже в декабре 2001 г. был утвержден стандарт IEEE 802.16 «Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems» — «Воздушный интерфейс для фиксированных систем с широкополосным беспроводным доступом» (официально опубликован 8 апреля 2002 г.). Он описывал общие принципы построения систем широкополосного беспроводного доступа и сосредоточивался на диапазоне 10–66 ГГц. Отметим, что 15 января 2003 г. был опубликован документ IEEE 802.16c — поправки и дополнения к IEEE 802.16, касающиеся работы в диапазоне 10–66 ГГц. 10 сентября 2001 г. увидел свет стандарт IEEE 802.16.2 «Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems» («Существование фиксированных систем широкополосного беспроводного доступа»). Над более низкочастотным диапазоном работы продолжались чуть дольше — стандарт IEEE 802.16a «Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz» («Модификации управления доступом к среде передачи и дополнительные спецификации физического уровня для диапазона 2–11 ГГц»), регламентирующий работу в диапазоне 2–11 ГГц, был утвержден 29 января 2003 г., а 1 апреля опубликован.

Разумеется, работать с тремя документами вместо одного неудобно. Кроме того, сразу же после публикации этих стандартов стали появляться многочисленные исправления и дополнения, только что выявленные на практике. Труд учитывать все эти поправки взяла на себя рабочая группа 802.16d IEEE. Непосредственно к работе по созданию единого документа с учетом всех поправок она приступила 11 сентября 2003 г. (рабочее название draft-версия того периода — 802.16REVd). Почти через год, 24 июня 2004 г., был официально утвержден новый стандарт — 802.16-2004, заменяющий собой документы 802.16-2001, 802.16c-2002 и 802.16a-2003.

В Европе Институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI принял континентальный эквивалент стандарта IEEE 802.16, именуемый ETSI HIPERMAN. Отметим, что HIPERMAN — это подмножество IEEE 802.16, он предусматривает работу в диапазоне 2–11 ГГц и только в одном из режимов — WirelessMAN-OFDM (см. далее).

Часто используют коммерческое имя стандарта IEEE 802.16 — WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Произошло оно от названия международной организации WiMax Forum (www.wimaxforum.org), в которую входит ряд ведущих коммуникационных и полупроводниковых компаний (Airspan Networks, Alvarion Ltd, Aperto Networks, Fujitsu Microelectronics America, Intel, OFDM Forum, Proxim Corporation, Wi-LAN Inc и др.). Однако следует помнить, что на самом деле WiMax, равно как и европейский HIPERMAN, рассматривает только режим WirelessMAN-OFDM.

WiMax Forum был организован 11 апреля 2003 г. Его целью является содействие разработке беспроводного оборудования для доступа к широкополосным сетям, скорейшее развертывание сетей во всем мире и сертификация оборудования IEEE 802.16, а также подготовка спецификаций, призванных обеспечить совместимость оборудования разных производителей. Одна из целей WiMax — дальнейшее разделение труда на рынке производителей беспроводного оборудования. Постановки элементной базы, такие, как Intel и Fujitsu, будут разрабатываться для всех производителей оборудования, а производители оборудования смогут сконцентрировать свои усилия на оборудовании со стандартной элементной базой. По данным аналитиков, члены WiMax Forum представляют собой более 75% рынка производителей оборудования широкополосного беспроводного доступа. Ожидается, что WiMax Forum начнет сертификацию оборудования в июле 2005 г. В качестве сертификационной лаборатории уже выбран испанская компания Cetecosi. По условиям WiMax сертификация должна проводиться с проверкой совместимости оборудования трех производителей с одинаковыми профилями.

11.2. Общие принципы IEEE 802.16-2004

Разработанный IEEE стандарт IEEE 802.16-2004 [56] представляет собой рассчитанную на внедрение в городских распределенных (региональных) беспроводных сетях (WirelessMAN) технологию беспроводного широкополосного доступа операторского класса. В последнем — его основное отличие от группы стандартов IEEE 802.11, ориентированных на работу в безлицензионном диапазоне.

При создании стандарта были существенно изменены основополагающие принципы, заложенные в беспроводные системы на предыдущих этапах. Первостепенное значение приобрело оптимальное использование спектрального ресурса радиоканала при любых соот-

ношениях «скорость–помехоустойчивость», а также необходимость обеспечивать заданный уровень качества обслуживания (QoS) любому абоненту сети.

Стандарт IEEE 802.16-2004 описывает принципы построения сетей регионального масштаба в диапазонах до 66 ГГц, точнее, их физический и MAC-уровни (радиоинтерфейсы, методы модуляции и доступа к каналам, системы управления потоками, структуры передаваемых данных, механизмы сопряжения протоколов передачи данных верхних уровней (прежде всего ATM и IP) с протоколами физического уровня IEEE 802.16 и др.). Стандарт предусматривает пять режимов организации работы сети (табл. 11.1). Только один из них — WirelessMAN-SC — предназначен для диапазона 10–66 ГГц. Он ориентирован на магистральные сети («точка-точка», «точка-многоточка»), работающие в режиме прямой видимости (так как затухание столь высокочастотных сигналов при отражении очень велико), с типичными скоростями потока данных (bit stream) 120 Мбит/с и шириной канала порядка 25 МГц.

Остальные режимы разработаны для диапазонов менее 11 ГГц. Один из них — WirelessMAN-SCa — это «низкочастотная» вариация WirelessMAN-SC (с рядом дополнительных механизмов). Два других режима — WirelessMAN-OFDM и WirelessMAN-OFDMA — это совсем новые методы, ранее входившие в утвержденный в 2003 г. стандарт IEEE 802.16a, но с тех пор претерпевшие ряд изменений.

В стандарте IEEE 802.16-2004 предусмотрен и режим работы в безлицензионном (в США) диапазоне WirelessHUMAN (High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network). Фактически речь идет об адаптации методов WirelessMAN-OFDM и WirelessMAN-OFDMA для работы в диапазоне 5–6 ГГц. Основные отличия WirelessHUMAN — это использование только временного дуплексирования, режим динамического распределения частот (DFS — dynamic frequency selection) и механизм сквозной нумерации частотных каналов. Однако, поскольку в России безлицензионных диапазонов в гигагерцевой области нет и ничего подобного нам не грозит, подробно останавливаться на данном режиме не будем.

Отметим, что все режимы диапазона ниже 11 ГГц отличает три характерные детали — механизмы автоматического запроса повторной передачи (ARQ — automatic repeat request), поддержка работы с адаптивными антенными системами (AAS — adaptive antenna system) и пространственно-временное кодирование (STC — space time coding). Кроме того, помимо централизованной архитектуры «точка-многоточка», в режиме WirelessMAN-OFDM предусмотрена поддерж-

ка архитектуры Mesh-сети («сетки» — децентрализованной сети взаимодействующих друг с другом систем, узлы которой не только обеспечивают доступ к среде передачи, но и поддерживают ретрансляцию трафика). Примечательно, что если в документе IEEE 802.16a речь шла о диапазоне 2–11 ГГц, то в стандарте 802.16-2004 нижняя граница так четко не оговаривается (упоминается, «как правило, не ниже 1 ГГц»). Хотя по информации ряда аналитиков известно, что всерьез рассматривается возможность использования диапазона 700 МГц для нового стандарта для мобильных абонентов IEEE 802.16e.

Таблица 11.1. Основные режимы в стандарте IEEE 802.16-2004

Режим	Частотный диапазон	Опции	Метод дуплексирования
WirelessMAN-SC	10–66 ГГц		TDD/FDD
WirelessMAN-SCa	< 11 ГГц	AAS/ARQ/STC/256-QAM	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDM	< 11 ГГц	AAS/ARQ/STC/Mesh	TDD/FDD
WirelessMAN-OFDMA	< 11 ГГц	AAS/ARQ/STC	TDD/FDD
WirelessHUMAN	< 11 ГГц*	DFS/AAS/ARQ/Mesh/STC	TDD

* Безлицензионный диапазон (в США и Европе).

11.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.16

11.3.1. Структура MAC-уровня

Задачи непосредственной доставки потоков данных между БС и абонентскими станциями решаются на физическом уровне стандарта IEEE 802.16. Функции же, связанные с формированием структур этих данных, а также управлением работой системы IEEE 802.16, реализуются на MAC-уровне. Оборудование стандарта IEEE 802.16 призвано формировать транспортную среду для различных приложений (сервисов), поэтому первая задача, решаемая в IEEE 802.16 — это механизм поддержки разнообразных сервисов верхнего уровня. Разработчики стандарта стремились создать единый для всех приложений протокол MAC-уровня, независимо от особенностей физического канала. Это существенно упрощает связь терминалов конечных пользователей с городской сетью передачи данных — физически

среды передачи в разных фрагментах WMAN могут быть различными, но структура данных одина. В одном канале могут работать (не одновременно) сотни различных терминалов еще большего числа конечных пользователей. Этим пользователям необходимы самые разные сервисы (приложения) — потоки голоса и данных с временным разделением, соединения по протоколу IP, пакетная передача речи через IP (VoIP) и т. п. Более того, заданное качество услуг (QoS) каждого отдельного сервиса не должно изменяться при работе через сети IEEE 802.16. Алгоритмы и механизмы доступа MAC-уровня должны уверенно решать все эти задачи.

Структурно MAC-уровень стандарта IEEE 802.16 подразделяется на три подуровня (рис. 11.1) — подуровень преобразования сервиса CS (Convergence Sublayer), основной подуровень CPS (Common Part Sublayer) и подуровень защиты PS (Privacy Sublayer). На подуровне защиты реализуются функции криптозащиты данных и механизмы аутентификации/предотвращения несанкционированного доступа. Для этого предусмотрены два основных компонента — набор алгоритмов криптозащиты и протокол управления ключом шифрования. Ключ каждой абонентской станции (АС) базовая станция (БС) может передавать в процессе авторизации, используя схему работы «клиент (АС) — сервер (БС)».



Рис. 11.1. MAC-уровень в стандарте IEEE 802.16

На подуровне преобразования сервиса происходит трансформация потоков данных протоколов верхних уровней для передачи через сети IEEE 802.16. Для каждого типа приложений верхних уровней стандарт предусматривает свой механизм преобразования. На сегодня описаны и вошли в спецификацию IEEE 802.16 два основных типа сервисных потоков — ATM и пакетная передача. Последняя подразумевает достаточно широкий набор различных протоколов —

IP, Ethernet (IEEE 802.3), виртуальные ЛВС (VLAN, IEEE 802.1Q-1998). Цель работы на CS-подуровне — оптимизация передаваемых потоков данных каждого приложения верхнего уровня с учетом их специфики. Поэтому важнейшая задача, решаемая на данном подуровне, — задача классификации пакетов/ячеек. От ее результатов зависит и оптимизация передаваемых потоков, и выделение полосы пропускания для каждого из них.

Для оптимизации транслируемых потоков предусмотрен специальный механизм удаления повторяющихся фрагментов заголовков PHS (Payload Header Suppression). Действительно, и в ATM, и в пакетном режиме данные передаются отдельными порциями — ячейками и пакетами. Каждая такая порция данных состоит, в общем случае, из заголовка и поля данных — фиксированных размеров для ячеек ATM (5 и 48 байт соответственно) и достаточно произвольных при пакетной передаче. Во многих случаях заголовки пакетов и ячеек содержат повторяющуюся информацию, излишнюю при трансляции посредством протокола IEEE 802.16. Механизм PHS позволяет избавиться от передачи избыточной информации: на передающем конце пакеты приложений в соответствии с определенными правилами преобразуются в структуры данных MAC-уровня IEEE 802.16, на приемном — восстанавливаются.

11.3.2. Соединения и сервисные потоки

Ключевой момент в стандарте IEEE 802.16 — это понятие сервисного потока и связанные с ним понятия «соединение» и «идентификатор соединения» (CID). Поскольку система IEEE 802.16 — лишь транспортная среда, ее инфраструктура фактически формирует коммуникационные каналы для потоков данных различных приложений верхних уровней (сервисов), таких, как передача видеоданных, ATM-потоки, IP-потоки, передача телефонных мультиплексированных пакетов типа E1 и т. д. Каждое из таких приложений обладает своими требованиями к скорости передачи, надежности (качеству обслуживания, QoS), криптозащите и т. д.

Сервисным потоком в стандарте IEEE 802.16 называется поток данных, связанный с определенным приложением. Сервисный поток характеризуется набором требований к каналу передачи информации — времени задержки символов, уровню флуктуаций задержек (джиттеру) и гарантированной пропускной способности. Каждому сервисному потоку в сети присваивается идентификатор SFID (32 разряда), основываясь на котором БС (а в ряде случаев и АС)

определяют необходимые параметры соединения, связанного с конкретным данным сервисным потоком. Для общей стандартизации работы в сети используется понятие сервисного класса — устойчивого набора параметров для стандартных приложений, например для трансляции телефонных каналов Е1. Параметры сервисного потока можно задать, просто указав его принадлежность к определенному сервисному классу.

В терминологии IEEE 802.16 соединение — это установление логической связи на MAC-уровнях на передающей и приемной стороне для передачи сервисного потока. Каждому соединению присваивается 16-разрядный идентификатор CID, с которым однозначно связаны тип и характеристики соединения. В частности, по запросу предоставления/изменения полосы пропускания со стороны АС базовая станция сразу понимает, с каким сервисным потоком имеет дело и какие условия передачи ему нужно обеспечить. Так, при начальной инициализации в сети каждой АС назначается три CID для служебных сообщений трех уровней. Принципиально, что одна АС может устанавливать множество различных соединений с различными CID. Характерен пример, когда связь крупного офиса с телекоммуникационным узлом организована через систему IEEE 802.16. В этом случае одна АС в офисе может поддерживать совершенно разные приложения — телефонию, телевидение, доступ в Интернет и в распределенную корпоративную сеть и т. д. Каждое из этих приложений предъявляет свои требования к QoS и скорости передачи, которые нужно удовлетворить. Посредством CID базовая станция узнает, с чем имеет дело, и предоставляет необходимый ресурс.

11.3.3. Пакеты MAC-уровня

Весь поток данных в сетях IEEE 802.16 — это поток пакетов. На основном подуровне MAC формируются пакеты данных (MAC PDU — MAC Protocol Data Unit, блоки данных MAC-уровня), которые затем передаются на физический уровень, инкапсулируются в физические пакеты и транслируются через канал связи. Пакет MAC PDU (далее — PDU) включает заголовок и поле данных (его может и не быть), за которым может следовать контрольная сумма CRC (рис. 11.2). Заголовок PDU занимает 6 байт и может быть двух типов — общий и заголовок запроса полосы пропускания. Общий заголовок используется в пакетах, у которых присутствует поле данных. В общем заголовке указывается идентификатор соединения (CID), тип и контрольная сумма заголовка, а также приводится информация о поле данных (табл. 11.2).

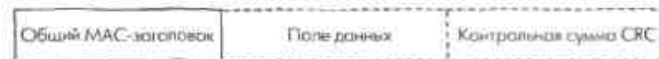


Рис. 11.2. Пакет MAC-уровня IEEE 802.16

Заголовок запроса полосы (также 6 байт) применяется, когда АС просит у БС выделить или увеличить ей полосу пропускания в восходящем канале. При этом в заголовке указывается CID и размер требуемой полосы (в байтах, без учета заголовков физических пакетов). Поля данных после заголовков запроса полосы нет.

Таблица 11.2. Структура общего заголовка MAC PDU (от старшего к младшим байтам)

Поле	Длина, бит
тип заголовка = 0	1
признак шифрования поля данных	1
тип подзаголовков	6
не используется	1
признак наличия CRC	1
индекс ключа шифрования	2
не используется	1
длина пакета, включая заголовок (байт)	11
идентификатор соединения CID	16
контрольная сумма заголовка (заданный полином $g(D) = D^8 + D^2 + D + 1$)	8

Поле данных может содержать:

- подзаголовки MAC;
- управляющие сообщения;
- собственно данные приложений верхних уровней, преобразованные на CS-подуровне.

MAC-подзаголовки могут быть пяти типов: упаковки, фрагментации, управления предоставлением канала, а также подзаголовки Mesh-сети и подзаголовок канала быстрой обратной связи Fast Feedback.

Подзаголовок упаковки используется, если в поле данных одного PDU содержится несколько пакетов верхних уровней; *подзаголовок фрагментирования* — если, напротив, один пакет верхнего уровня разбит на несколько PDU.

Подзаголовок управления предоставлением доступа предназначен для того, чтобы АС сообщила БС изменение своих потребностей в полосе пропускания (число байт в восходящем канале для определенного соединения, сообщение о переполнении выходной очереди в

АС, требование регулярного опроса со стороны БС для выяснения необходимой полосы).

Подзаголовок Fast Feedback служит для назначения конкретной АС интервала для быстрого ответа на запрос БС (например, в ходе процедур измерения характеристик канала).

Управляющие сообщения — это основной механизм управления системой IEEE 802.16. Всего зарезервировано 256 типов управляющих сообщений, из них используется 48. Формат управляющих сообщений прост — поле типа сообщения (1 байт) и поле данных (параметров) произвольной длины.

Описание профилей пакетов, управление доступом, механизмы криптозащиты, динамическое изменение работы системы и т. д. — все функции управления, предоставления доступа, запроса и подтверждения реализуются через управляющие сообщения. Рассмотренные ниже карты входящего/исходящего каналов (UL-/DL-MAP) также являются управляющими сообщениями.

11.3.4. Общая структура кадров IEEE 802.16

Для понимания принципов управления соединениями и потоками данных в сетях IEEE 802.16 рассмотрим общие принципы передачи в физическом канале.

Передача данных на физическом уровне происходит посредством непрерывной последовательности кадров фиксированной длительности. Кадр состоит из двух субкадров — для исходящего потока (от базовой станции к АС) и для восходящего (от АС к БС). Дуплексный механизм предусматривает как частотное (FDD — frequency division duplex), так и временное (TDD — time division duplex) разделение восходящего и исходящего субкадров.

При временном дуплексировании каналов кадры передаются в одном частотном диапазоне, сначала исходящий (DL), затем восходящий (UL). При частотном дуплексировании восходящий и исходящий субкадры транслируются одновременно, но с частотным разносом.

DL-субкадр начинается с синхронизирующей последовательности (преамбулы), за которой следует управляющая секция с набором широкополосных (предназначенных всем) служебных сообщений. За ними передаются пакеты физического уровня, содержащие как служебные сообщения, так и данные для различных АС.

Пакеты в исходящем субкадре следуют друг за другом без интервалов. Чтобы абонентские станции могли отличить один пакет

от другого, в управляющей секции передаются карты нисходящего (DL-MAP) и восходящего (UL-MAP) каналов. В карте нисходящего канала указана длительность и номер кадра, идентификационный номер базовой станции, номер последнего переданного дескриптора нисходящего канала (в котором описаны профили пакетов текущего кадра), а также точка начала и тип профиля каждого пакета. Точка начала отсчитывается в так называемых физических слотах, размер которых различен для каждого из режимов IEEE 802.16. Например, в режимах SC и SCa физический слот равен четырем модуляционным символам.

Профиль пакета — это список его параметров, включая метод модуляции, тип FEC-кодирования (с параметрами схем кодирования), а также диапазон значения отношения сигнал/шум в приемном канале конкретной станции, при котором данный профиль может применяться. Каждому профилю пакета в нисходящем/восходящем канале присваивается идентификационный код DIUC/UIUC (Downlink/Uplink Interval Usage Code), который и используется в карте нисходящего канала при распределении ресурсов. Список профилей в виде специальных управляющих сообщений — дескрипторов нисходящего и восходящего каналов (DCD/UCD) — транслируется базовой станцией с периодом не менее 10 с.

В восходящем субкадре для каждой передающей АС базовая станция резервирует специальные временные интервалы (или частотно-временные для режимов OFDMA и частично OFDM) — тайм-слоты. Информация о распределении тайм-слотов между АС записывается в карте восходящего канала UL-MAP, транслируемой в каждом кадре. UL-MAP функционально аналогична DL-MAP — в ней сообщается, сколько тайм-слотов в субкадре, точка начала и идентификатор соединения для каждого из них, а также типы профилей всех пакетов. Сообщение UL-MAP текущего кадра может относиться как к данному кадру, так и к последующему.

Кроме назначенных БС тайм-слотов для определенных АС, в UL-канале предусмотрены интервалы конкурентного доступа, в течение которых АС может передать сообщение для первичной регистрации в сети или для запроса канала/изменения полосы пропускания предоставленного канала.

11.3.5. Принцип предоставления канальных ресурсов

Основной принцип предоставления доступа к каналу в стандарте IEEE 802.16 — это доступ по запросу Demand Assigned Multiple Access

(DAMA). Ни одна АС не может ничего передавать, кроме запросов на регистрацию и предоставление канала, пока БС не разрешит ей этого, т.е. ответит временной интервал в восходящем канале и укажет его расположение в карте UL-MAP. Абонентская станция может как запрашивать определенный размер полосы в канале, так и просить об изменении уже предоставленного ей канального ресурса.

Стандарт IEEE 802.16 предусматривает два режима предоставления доступа — для каждого отдельного соединения и для всех соединений определенной АС. Очевидно, что первый механизм обеспечивает большую гибкость, однако второй существенно сокращает объем служебных сообщений и требует меньшей производительности от аппаратуры.

Запросы полосы могут быть как спорадическими для БС, так и планируемыми. В первом случае запросы реализуются посредством пакетов, состоящих из заголовка запроса, передаваемых на конкурентной основе в специально выделенном для них интервале восходящего канала. Поскольку эти запросы спонтанны, в данных интервалах возможны коллизии, вызванные одновременной работой передатчиков двух и более АС.

Принцип борьбы с коллизиями аналогичен используемому в стандарте IEEE 802.11: после того как АС решила, что ей нужно зарегистрироваться/запросить канал, она не начинает трансляцию в первом же предназначенном для этого интервале. В АС есть генератор случайных чисел (ГСЧ), выбирающий значения из некоего диапазона от 0 до $2^n - 1$. Так, если $n = 4$, ГСЧ выбирает числа в диапазоне 0–15, например 11. Далее АС отсчитывает 11 интервалов, предназначенных для регистрации/запроса канала, и только в 12-м выходит в эфир. Если передача прошла успешно и БС приняла запрос, она в определенный период ответит специальным сообщением. В противном случае АС считает попытку неудачной и повторяет процедуру, только интервал выбора для ГСЧ удваивается. Такая последовательность действий продолжается до тех пор, пока не будет получен ответ от БС. Максимальный размер диапазона возможных значений ГСЧ ограничен — при его достижении он вновь принимает минимальное значение.

Процедура плановых запросов полосы в восходящем канале называется опросом (polling) — БС как бы запрашивает у АС их потребности в канальных ресурсах. Реально это означает, что базовая станция предоставляет конкретной АС интервал для передачи запроса о предоставлении/изменении полосы, т.е. никакой конкуренции уже нет.

Опрос может быть в «реальном времени» — интервалы для запроса предоставляются АС с тем же периодом, с каким у нее может возникнуть потребность в изменении условий доступа (например, в каждом кадре). Этот режим удобен для приложений, когда пакеты данных следуют с фиксированным периодом, но их размер не стабилен (например, видео-MPEG). Другой вариант опроса — вне «реального времени». В этом случае БС предоставляет АС интервал для запроса также периодически, но период этот существенно больше, например, 1 с. Характерное приложение, для которого эффективен этот механизм, — FTP-протокол.

Для приложений, у которых периодичность и размер пакетов фиксированы (например, в телефонии цина Е1), предусмотрен механизм доступа к каналу без требования (Unsolicited Grant Service — UGS). В этом случае БС предоставляет АС для передачи данных интервалы фиксированного размера с заданным периодом, соответствующим скорости потока данных.

Если в ходе работы АС нужно изменить условия доступа, она делает это посредством специального MAC-подзаголовка управления предоставлением канала. В этом подзаголовке есть специальный флаг «опроси меня», установив который АС просит у БС интервал для запроса новой полосы. Кроме того, в этом подзаголовке АС может непосредственно запросить у БС дополнительную прибавку (в байтах) к уже предоставленной полосе для конкретного соединения (так называемый PiggyBack Request). В подзаголовке предоставления канала также есть специальный бит индикации переполнения входного буфера передатчика АС, что приводит к потере данных (slip). БС может среагировать на появление этого сигнала, например увеличив полосу для данной АС.

11.3.6. Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь

Пожалуй, наиболее существенные особенности MAC-уровня для диапазона ниже 11 ГГц — это процедура подтверждения приема пакетов и их повторной отправки (ARQ), а также функция быстрой организации канала обратной связи. Механизм ARQ достаточно хорошо известен и основан на способности корректирующих кодов обнаруживать ошибки передачи. Кратко напомним суть этого механизма. Каждый пакет при передаче кодируется линейным циклическим корректирующим кодом с достаточным числом проверочных символов. На приемной стороне после декодирования проверяется безо-

шибочность принятого кодового слова. Для этого вычисляется так называемый синдром — вектор, равный произведению вектора принятого сигнала и присущей коду матрицы проверочных уравнений. Если синдром нулевой — слово кодовое (т. е. не содержит ошибок), если ненулевой — некодовое. Даже в очень плохом канале с вероятностью ошибки, стремящейся к 0,5, вероятность ошибки декодирования можно сделать сколь угодно малой, выбирая достаточное число проверочных символов, правда, ценой существенного снижения скорости передачи.

Получив пакет, приемник обязан отправить передатчику квитанцию подтверждения (значение синдрома, ноль или нет). Все пакеты нумеруются, поэтому приемник сразу обнаруживает сбой в получении определенного пакета и сообщает об этом передатчику, который повторно отправляет пакет, принятый с неустраняемыми ошибками. Режим ARQ — опциональный и назначается конкретному соединению. Причем в рамках одного соединения весь трафик может передаваться либо с применением ARQ, либо без него, смешение недопустимо. Очевидно, что режим ARQ требует эффективного быстрого обратного канала для подтверждения приема. Для этого предназначено специальное сообщение, о наличии которого в пакете сигнализирует специальный признак в основном MAC-заголовке пакета.

Быстро и гарантированного ответа со стороны АС, помимо ARQ, требуют и ряд других механизмов стандарта. Быстрая обратная связь необходима для периодического измерения параметров канала, запросов физических параметров каналов, коррекция мощности передатчиков и др. Особое значение эти процедуры приобретают при работе с адаптивными многолучевыми антенными системами, где важно определить физические параметры канала связи в каждом луче (секторе). Данные процедуры заключаются в отправке специальных сообщений и получении данных об условиях их прохождения через канал. В разных режимах (SCa, OFDM, OFDMA) названия и тип подобных сообщений несколько различны, однако сущность от этого не меняется. Поэтому в стандарте IEEE 802.16 предусмотрен набор процедур для обеспечения быстрой обратной связи.

Например, для приоритетной передачи таких данных абонентскими станциями в режиме OFDMA предусмотрен специальный тип сообщений быстрой обратной связи FAST FEEDBACK. Для них выделяется специальная область (канал) в восходящем субканале. Сами сообщения обратной связи представляют собой 4-разрядные двоичные числа, расположение которых в канале обратной связи для каждой АС базовая станция задает в специальном подзаголовке FAST

FEEDBACK. В этом же подзаголовке указывается тип (назначение) сообщения — измерение мощности в нисходящем канале, коэффициенты антенн БС в режиме AAS и др. Предусмотрены и специальные меры для успешной доставки этих 4-разрядных сообщений с 24-кратной избыточностью: каждое сообщение (4 бита) занимает один OFDMA-слот (3 символа \times 1 субканал, 6 фрагментов, 48 информационных несущих — см. раздел 11.6), т. е. 4-битной последовательности поставлен в соответствие фиксированный набор всех 48 информационных несущих в слоте. Модуляция в FAST FEEDBACK-канале — QPSK, 2 бита на символ, соответственно на каждый информационный бит сообщения приходится 24 транспонированных бита. Данная избыточность в определенной мере гарантирует достоверный прием сообщения.

11.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC

На физическом уровне стандарт IEEE 802.16 предусматривает три принципиально различных метода передачи данных — метод модуляции одной несущей (SC — single carrier, в диапазоне ниже 11 ГГц — SCa), метод модуляции посредством ортогональных несущих OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) и метод мультиплексирования (множественного доступа) посредством ортогональных несущих OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) (см. табл. 11.1). Отметим, что режим SCa отличается от своего более высокочастотного собрата SC прежде всего методами помехоустойчивого кодирования и модуляции (допускается 256-уровневая квадратурная модуляция 256-QAM).

Метод WirelessMAN-SC стандарта IEEE 802.16 описывает работу в диапазоне 10–66 ГГц сетей с архитектурой «точка-многоточка» (из центра — многим). Это двунаправленная система, т. е. предусмотрены нисходящий и восходящий потоки. При этом каналы подразумеваются широкополосные (до 25–28 МГц), а скорости передачи — высокие (например, 120 Мбит/с).

11.4.1. Канальное кодирование

Тракт обработки данных и формирования выходного сигнала для передачи через радиоканал в стандарте IEEE 802.16 достаточно обычен для современных телекоммуникационных протоколов (рис. 11.3) и практически одинаков для восходящих и нисходящих соединений.



Рис. 11.3. Тракт преобразования сигнала в режиме WirelessMAN-SC

Входной поток данных скремблируется — подвергается рандомизации, т.е. умножению на псевдослучайную последовательность (ПСП), получаемую в 15-разрядном сдвиговом регистре (рис. 11.4) (задающий полином ПСП — $c(x) = x^{15} + x^{14} + 1$, начальное значение — $4A80_{16}$). Далее скремблированные данные защищают посредством помехоустойчивых кодов (FEC-кодирование). При этом можно использовать одну из четырех схем кодирования: код Рида-Соломона с символами из поля Галуа GF(256), каскадный код с внешним кодом Рида-Соломона и внутренним сверточным кодом с кодовым ограничением $K = 7$ (скорость кодирования — 2/3) с декодированием по алгоритму Витерби, каскадный код с внешним кодом Рида-Соломона и внутренним кодом с проверкой на четность (8, 6, 2) и блочный турбокод. Размер кодируемого информационного блока и число избыточных байт не фиксированы — эти параметры можно задавать в зависимости от условий среды передачи и требований QoS. Так, для кода Рида-Соломона размер исходного блока данных может быть от 6 до 255 байт, а число избыточных байт — до 32 (всего до 255 байт). Первые два алгоритма кодирования обязательны для всех устройств стандарта, остальные два алгоритма — опциональны.



Рис. 11.4. Генерация ПСП для рандомизации данных

Метод WirelessMAN-SC, как и следует из его названия, предусматривает схему с модуляцией одной несущей в каждом частотном канале. Допускается три типа квадратурной амплитудной модуляции: 4-позиционная QPSK и 16-позиционная 16-QAM (обязательны для всех устройств), а также 64-QAM (опционально). Кодированные блоки данных преобразуются в модуляционные символы (каждые 2/4/6 бит определяют один символ QPSK/16-QAM /64-QAM) в соответствии с приведенными в стандарте таблицами — каждой группе из 2/4/6 бит ставится в соответствие синфазная (I) и квадратурная (Q) координаты. Далее последовательность дискретных значений в каналах I и Q преобразуется посредством так называемого синусквадратного фильтра (square-root raised cosine filter) в непрерывные (сглаженные) сигналы. Передаточная функция синусквадратного фильтра записывается как

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| < f_N(1 - \alpha) \\ \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{2f_N} \left(\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right) \right]}, & f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha) \\ 0, & |f| > f_N(1 + \alpha), \end{cases}$$

где α — коэффициент избирательности (по стандарту IEEE 802.16 $\alpha = 0,25$); f_N — частота Найквиста, равная половине частоты дискретизации.

Фильтрованные потоки $I(t)$ и $Q(t)$ поступают непосредственно в квадратурный модулятор, где формируется выходной сигнал

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t),$$

где f_c — несущая частота. Далее сигнал усиливается и передается в эфир. На приемной стороне все происходит в обратном порядке. В результате в зависимости от ширины канала и метода модуляции формируется достаточно широкий набор скоростей потока данных (табл. 11.3).

11.4.2. Структура кадров

Передача данных на физическом уровне происходит посредством непрерывной последовательности кадров. Каждый кадр имеет фиксированную длительность — 0,5; 1 и 2 мс, поэтому его информационная емкость зависит от символьной скорости и метода модуляции. Кадр состоит из преамбулы (синхропоследовательности длиной 32 QPSK-символа), управляющей секции и последовательности пакетов с данными (рис. 11.5). Управляющая секция может содержать

карты DL-MAP и дескрипторы нисходящего/восходящего каналов. Сообщения этой секции всегда передаются посредством QPSK.

Таблица 11.3. Скорость физического потока данных в зависимости от вида модуляции и ширины канала

Ширина канала, МГц	Скорость символов, Мбод	Скорость физического потока данных, Мбит/с		
		QPSK	16-QAM	64-QAM
20	16	32	64	96
25	20	40	80	120
28	22,4	44,8	89,6	134,4

Поскольку определяемая стандартом IEEE 802.16 система двуправленная, необходим дуплексный механизм. Он предусматривает как частотное (FDD — frequency division duplex), так и временное (TDD — time division duplex) разделение восходящего и нисходящего каналов.

При временном дуплексировании каналов кадр делится на нисходящий и восходящий субкадры (их соотношение в кадре может гибко изменяться в процессе работы в зависимости от необходимой полосы пропускания для нисходящих и восходящих каналов), разделенные специальным интервалом (рис. 11.5, а). При частотном дуплексировании восходящий и нисходящий каналы транслируются каждый на своей несущей (рис. 11.5, б).



Рис. 11.5. Структура кадра в стандарте IEEE 802.16 для систем с временным (а) и частотным (б) дуплексированием каналов

В нисходящем канале информация от базовой станции передается в виде последовательности пакетов (метод временного мультиплексирования TDM — time division multiplex) (рис. 11.6). Для каждого пакета можно задавать метод модуляции и схему кодирования данных, т.е. выбирать между скоростью и надежностью передачи.

Данные о параметрах пакета, его длине, моменте начала передачи, а также о его принадлежности к определенному соединению (соответственно об адресации определенной АС) содержатся в карте нисходящего канала DL-MAP. Точка начала отсчитывается в так называемых физических слотах (один физический слот равен четырем модуляционным символам).

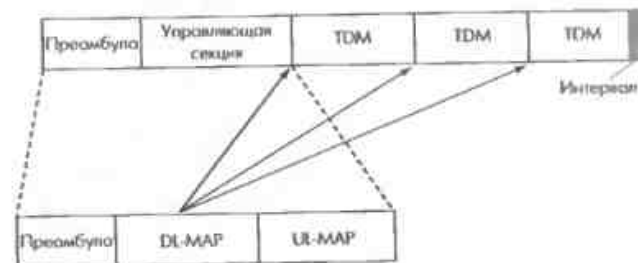


Рис. 11.6. Структура нисходящего канала

В нисходящем субкадре пакеты выстраиваются в очередь в зависимости от типа их кодирования и модуляции так, что самые помехозащищенные передаются первыми (управляющая секция всегда передается посредством QPSK-модуляции). Если этого не сделать, абонентские станции с плохими условиями приема, которым предназначаются наиболее защищенные пакеты, могут потерять синхронизацию в ожидании своей порции информации. Пакеты в нисходящем субкадре следуют друг за другом без интервалов и предваряющих их заголовков и идентифицируются абонентскими станциями на основе информации в DL-MAP.

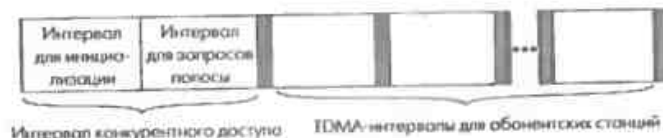


Рис. 11.7. Структура восходящего канала

Абонентские станции получают доступ к среде передачи посредством механизма временного разделения каналов (TDMA — time division multiple access) (рис. 11.7). Для этого в восходящем субкадре для каждой передающей АС базовая станция резервирует специальные временные интервалы — тайм-слоты. Информация о распределении тайм-слотов между АС записывается в карте восходящего канала UL-MAP, транслируемого в каждом кадре. UL-MAP функционально

аналогична DL-MAP — в ней сообщается, сколько слотов в субкадре, точка начала и идентификатор соединения для каждого из них, а также типы профилей всех пакетов. Скорость модуляции (частота символов) в восходящем канале должна быть такой же, как и в нисходящем. Отметим, что, в отличие от нисходящих TDM-пакетов, каждый пакет в восходящем канале начинается с преамбулы — синхропоследовательности длиной 16 или 32 QPSK-символа.

В восходящем канале также предусмотрены интервалы конкурентного доступа для первичной регистрации в сети или для запроса канала/изменения полосы пропускания канала.

Стандарт IEEE 802.16 допускает применение как дуплексных, так и полудуплексных абонентских станций. Последние не способны одновременно принимать и передавать информацию. В режиме FDD для полудуплексных АС, которые в силу конструктивных особенностей сначала принимают информацию и лишь затем передают свои данные, в нисходящем FDD-кадре предусмотрена TDMA-область — для таких станций информация передается в определенных временных интервалах (рис. 11.8). Причем нисходящие пакеты, передаваемые в режиме TDMA, обязательно снабжают преамбулой — синхропоследовательностью длиной 16 QPSK-символов, чтобы полудуплексные абонентские станции могли при необходимости восстановить синхронизацию.

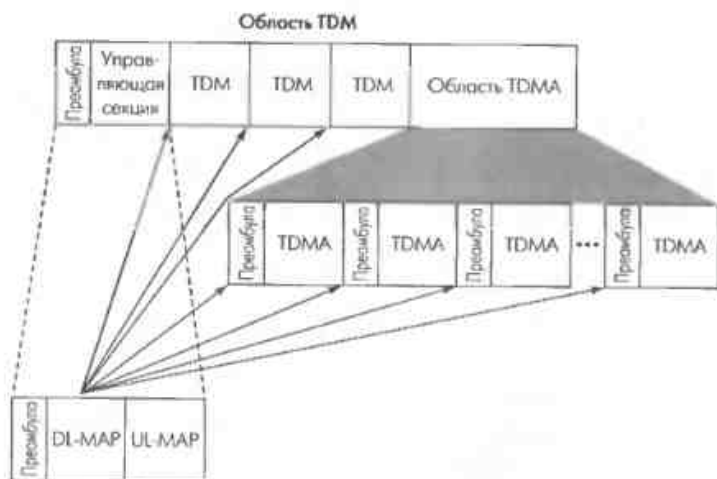


Рис. 11.8. Нисходящий канал в случае FDD при работе с полудуплексными абонентскими станциями

Отметим, что используемое в документе IEEE 802.16 терминологическое деление на TDM- и TDMA-области в нисходящем субкадре не совсем корректно, поскольку по смыслу в данном случае они практически идентичны. Видимо, проблема проистекает из первоначальной редакции стандарта IEEE 802.16-2001, в которой подразумевалось, что в режиме TDM каждая АС принимает «свои». В новой редакции указано, что распределение пакетов в DL-субкадре приведено в DL-MAP (хотя не исключается и «старая» схема). Единственное различие между TDM и TDMA — если при TDM пакеты следуют один за другим, без интервалов, то в зоне TDMA между отдельными пакетами с преамбулами возможны незаполненные интервалы, в течение которых передатчик БС «молчит».

11.5. Режим WirelessMAN-OFDM

Режим OFDM — это метод модуляции потока данных в одном частотном канале (шириной 1–2 МГц и более) с центральной частотой f_c . Деление же на каналы, как и в случае SC, — частотное. Напомним, что при модуляции данных посредством ортогональных несущих в частотном канале выделяются N поднесущих так, что $f_k = f_c + k\Delta f$, где k — целое число из диапазона $[-N/2, N/2]$ (в данном случае $k \neq 0$). Расстояние между ортогональными несущими составляет $\Delta f = 1/T_b$, где T_b — длительность передачи данных в одном OFDM-символе.

Кроме данных, в OFDM-символе передается защитный интервал длительностью T_g , так что общая длительность OFDM-символа $T_s = T_b + T_g$ (рис. 11.9). Защитный интервал представляет собой копию оконечного фрагмента символа. Его длительность T_g может составлять 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 от T_b .

Модуляция OFDM основана на двух основных принципах: разбиение одного канала с переменными параметрами на параллельные гауссовы каналы с различными отношениями сигнал/шум и точное измерение характеристик канала.

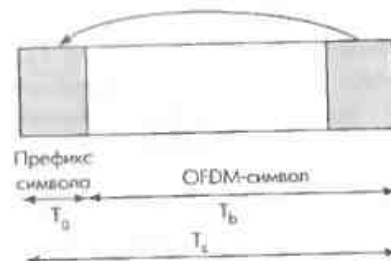


Рис. 11.9. OFDM-символ

В соответствии с первым принципом OFDM каждая поднесущая модулируется независимо посредством квадратурной амплитудной модуляции. Общий сигнал вычисляется посредством обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) как

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{i2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} c_k e^{i2\pi k \Delta f (t-T_s)} \right\} \quad (0 < t < T_s),$$

где c_k — комплексное представление символа квадратурной модуляции (QAM-символа). Комплексное представление удобно, поскольку генерация радиосигнала происходит посредством квадратурного модулятора в соответствии с выражением $s_k(t) = I_k \cos(2\pi f) - Q_k \sin(2\pi f)$, где I_k и Q_k — синфазное и квадратурное (целое и мнимое) значения комплексного символа соответственно.

Для работы алгоритмов БПФ/ОБПФ удобно, чтобы число точек соответствовало 2^m . Поэтому число несущих выбирают равным минимальному числу $N_{FFT} = 2^m$, превосходящему N . В режиме OFDM стандарта IEEE 802.16 $N = 200$, соответственно $N_{FFT} = 256$. Из них 55 ($k = -128 \dots -101$ и $101 \dots 127$) образуют защитный интервал на границах частотного диапазона канала. Центральная частота канала ($k = 0$) и частоты защитных интервалов не используются (т. е. амплитуды соответствующих им сигналов равны нулю). Оставшиеся 200 несущих — информационные.

В соответствии со вторым принципом OFDM для точного определения параметров канала необходимы так называемые пилотные несущие частоты, метод модуляции и передаваемый сигнал в которых хорошо известен всем станциям в сети. В методе OFDM предусмотрено использование восьми пилотных частот (с индексами ± 88 , ± 63 , ± 38 , ± 13). Остальные 192 несущие распределены между 16 логическими подканалами по 12 несущих в каждом, причем в одном подканале частоты расположены не подряд. Например, подканал 1 составляют несущие с индексами -100 , -99 , -98 , -37 , -36 , -35 , 1 , 2 , 3 , 64 , 65 , 66 . Деление на подканалы необходимо, поскольку в режиме WirelessMAN-OFDM предусмотрена (опционально) возможность работы не во всех 16, а в одном, двух, четырех и восьми подканалах — некий прообраз схемы множественного доступа OFDMA. Для этого каждый подканал и каждая группа подканалов имеют свой индекс (от 0 до 31).

Длительность полезной части T_b OFDM-символа зависит от ширины полосы канала BW и системной тактовой частоты (частоты дискретизации): $F_s = N_{FFT}/T_b$. Соотношение $F_s/BW = n$ нормиру-

ется и в зависимости от ширины полосы канала принимает значения 86/75 (BW кратно 1,5 МГц), 144/125 (BW кратно 1,25 МГц), 316/275 (BW кратно 2,75 МГц), 57/50 (BW кратно 2 МГц) и 8/7 (BW кратно 1,75 МГц и во всех остальных случаях).

11.5.1. Канальное кодирование

Кодирование данных на физическом уровне включает три стадии — рандомизацию, помехоустойчивое кодирование и перемежение. Рандомизация — это умножение блока данных на псевдослучайную последовательность (ПСП), которую формирует генератор ПСП с заданным полиномом вида $1 + x^{14} + x^{15}$ (см. рис. 11.4).

В нисходящем потоке генератор ПСП инициализируется с началом кадра посредством кодового слова 4A80₁₆. Начиная со второго пакета кадра генератор ПСП инициализируется на основе идентификационного номера базовой станции BSID, идентификатора профиля пакета и номера кадра (рис. 11.10). В восходящем потоке все происходит аналогично, с той лишь разницей, что инициализация генератора ПСП по схеме, приведенной на рис. 11.10, происходит с первого пакета (вместо кода профиля пакета нисходящего канала DIUC используется аналогичный идентификатор для восходящего канала UIUC).



Рис. 11.10. Формирование вектора инициализации генератора ПСП для рандомизации нисходящего потока OFDM

Кодирование данных предполагает кодирование каскадным кодом: внешним кодом Рида-Соломона и внутренним сверточным кодом. Алгоритм кодирования Рида-Соломона, используемый в данном стандарте, строится над полем Галуа GF(256). В базовом виде он оперирует блоками исходных данных по 239 байт, формируя из них кодированный блок размером 255 байт (добавляя 16 проверочных байт). Такой код способен исправить до 8 поврежденных байт или обнаружить до 15 поврежденных или стертых внутренним ко-

дом байт. Поскольку реально используются блоки данных меньшей длины K , перед ними добавляются $(239 - K)$ нулевых байт (так называемое укорочение линейного кода). После кодирования эти байты удаляются. Если необходимо сократить число проверочных слов, так чтобы уменьшить число восстанавливаемых байт T , используются только $2T$ первых проверочных байт. Обязательные для поддержки в IEEE 802.16 варианты каскадного кодирования приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4. Обязательные схемы кодирования/модуляции в режиме OFDM

Модуляция	Блок данных до кодирования, байт	Кодер Рида-Соломона	Скорость кодирования сверточного кодера	Суммарная скорость кодирования	Блок данных после кодирования, байт
BPSK	12	(12,12,0)	1/2	1/2	24
QPSK	24	(32,24,4)	2/3	1/2	48
QPSK	36	(40,36,2)	5/6	3/4	48
16-QAM	48	(64,48,8)	2/3	1/2	96
16-QAM	72	(80,72,4)	5/6	3/4	96
64-QAM	96	(108,96,6)	3/4	2/3	144
64-QAM	108	(120,108,6)	5/6	3/4	144

После кодера Рида-Соломона данные поступают в сверточный кодер (рис. 11.11) с порождающими последовательностями (генераторами кода) $G_1 = 171_8$ (для выхода X) и $G_2 = 133_8$ (для Y) – так называемый стандартный код NASA [19]. Его базовая скорость кодирования – 1/2, т.е. из каждого входного бита он формирует пару кодированных бит X и Y . Кодовое ограничение этого кода $K = 7$. Упуская («выкалывая» или перфорируя) из последовательности пар элементы X_i или Y_i , можно получать различные скорости кодирования. Так, скорости 2/3 соответствует последовательность $(X_1 Y_1 Y_2)$, скорости 3/4 – $(X_1 Y_1 Y_2 X_3)$, 5/6 – $(X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5)$.

Кодер Рида-Соломона не используется с двухпозиционной модуляцией BPSK (например, при начальной инициализации АС или ширине полосы). Он также пропускается, когда используется часть субканалов OFDM. В этом случае скорость сверточного кодирования принимается равной общей скорости кодирования (см. табл. 11.4) (соответственно размер исходного блока данных умножается на число используемых субканалов, деленное на 16).

Помимо описанного механизма кодирования, стандарт предусматривает опциональное применение блочных турбокодов (основанных на кодах Хемминга и контроле четности) и сверточных турбокодов.

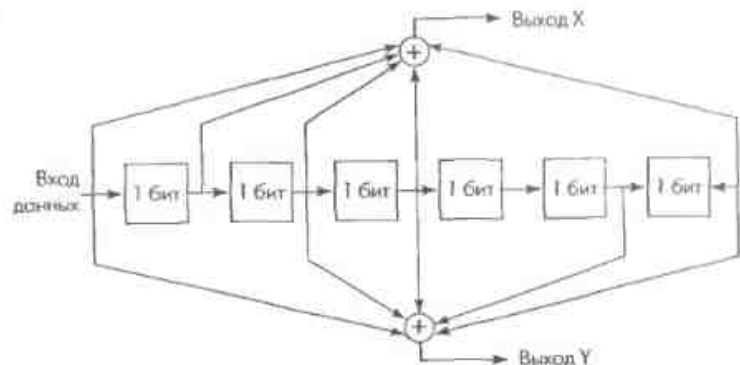


Рис. 11.11. Схема сверточного кодера

После кодирования следует процедура перемежения (интерливинга) – перемешивания бит в пределах блока кодированных данных, соответствующего OFDM-символу. Эта операция проводится в две стадии. Цель первой – сделать так, чтобы смежные биты оказались разнесенными по несмежным несущим. На второй стадии смежные биты оказываются разнесенными в разные половины последовательности. Все это делается для того, чтобы при групповых (пакетируемых) ошибках и символе повреждались не смежные биты, которые легко восстановить при декодировании. Перемежение реализуется в соответствии с формулами

$$\begin{aligned}
 m_k &= (N_{cbps}/12) \cdot (k \bmod 12) + \text{floor}(k/12); \\
 j_k &= s \cdot \text{floor}(m_k/s) + \\
 &\quad + [m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12m_k/N_{cbps})] \bmod s; \\
 k &= 0, \dots, N_{cbps} - 1.
 \end{aligned}
 \tag{11.1}$$

где m_k и j_k – номер исходного k -го бита после первой и второй стадии перемежения соответственно; N_{cbps} – число кодированных бит в OFDM-символе (при заданном числе субканалов); s – 1/2 числа бит на несущую (2/4/6 бит для QPSK/16-QAM/64-QAM соответственно, для BPSK $s = 1$). Функция $\text{floor}(x)$ – это наибольшее целое число, не превосходящее x ; функция $(x \bmod r)$ – остаток от x/r .

После перемежения начинается стадия модуляции. Исходя из выбранной схемы модуляции (BPSK/QPSK/16-QAM/64-QAM), блок представляется в виде последовательности групп бит, соответствующих модуляционным символам (по 1/2 /4/6 бит). Каждой группе ставятся в соответствие значения Q и I из векторных диаграмм

Грея (рис. 11.12), которые затем используются при непосредственной модуляции несущей. Для усреднения амплитуд квадратурных символов используются нормализованные значения Q и I , т. е. умноженные на коэффициенты c (для QPSK $c = \frac{1}{\sqrt{2}}$, для 16-QAM $c = \frac{1}{\sqrt{10}}$, для 64-QAM $c = \frac{1}{\sqrt{42}}$).

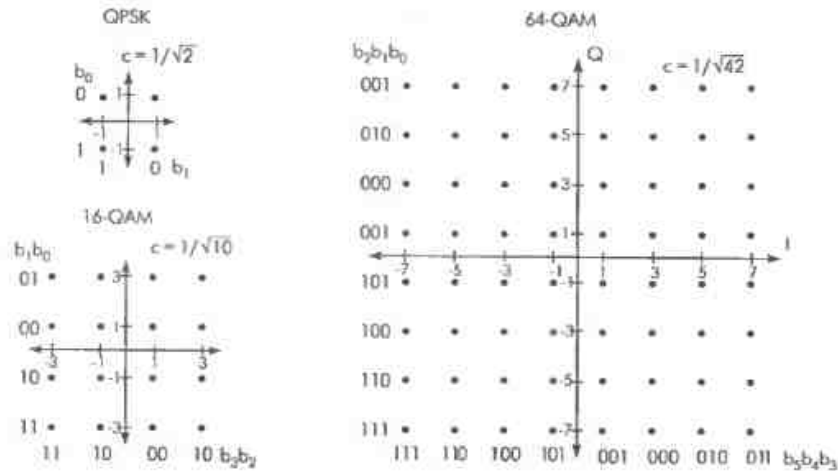


Рис. 11.12. Векторные диаграммы Грея (представление модуляционных символов) для QPSK, 16-QAM и 64-QAM

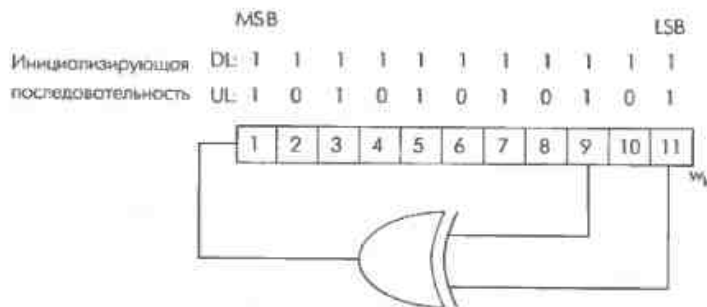


Рис. 11.13. Генерация модулирующей последовательности для пилотных несущих

Пилотные несущие модулируются посредством BPSK. Значения сигналов на этих несущих определяются на основании ПСП w_k с задающим полиномом $x^{11} + x^9 + 1$, причем в нисходящем субкадре k — номер символа относительно начала кадра, в восходящем — номер символа относительно начала пакета (рис. 11.13). Инициали-

зирующие слова генератора ПСП для нисходящего и восходящего потоков различны ($8FF_{16}$ и 555_{16} соответственно). Собственно значения BPSK-символов вычисляются как $c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$; $c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2\overline{w_k}$ в нисходящем канале и $c_{-88} = c_{-38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$; $c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2\overline{w_k}$ в восходящем. В результате получается так называемая ступенчатая конструкция OFDM.

После определения модуляционных символов посредством ОБПФ вычисляется сам радиосигнал и передается в передатчик. При приеме все процедуры происходят в обратном порядке.

11.5.2. Структура кадров

В режиме OFDM на физическом уровне для сетей с архитектурой «точка-многоточка» кадровая структура передачи принципиально мало чем отличается от режима SC. Так же как и в высокочастотной области, информационный обмен происходит посредством последовательности кадров (фреймов). Каждый фрейм (рис. 11.14) делится на два субкадра — нисходящий (DL — от БС к АС) и восходящий (UL — от АС к БС). Разделение на восходящий и нисходящий каналы — как временное (TDD), так и частотное (FDD). В последнем случае DL и UL транслируются одновременно, в разных частотных диапазонах.

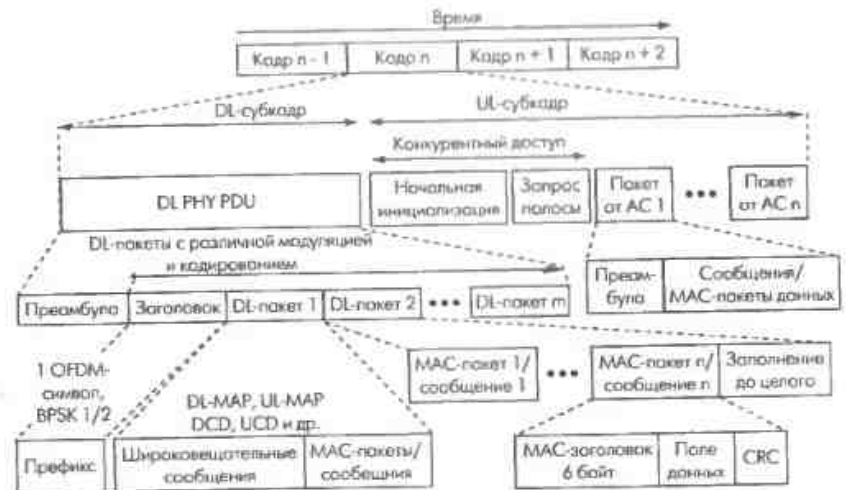


Рис. 11.14. Структура OFDM-кадров при временном дуплексировании

Нисходящий субкадр включает преамбулу, управляющий заголовок кадра (FCH — frame control header) и последовательность пакетов данных. Преамбула в нисходящем канале — посылка из двух OFDM-символов (длинная преамбула), предназначенная для синхронизации. Первый OFDM-символ использует поднесущие с индексами, кратными 4, второй — только четные поднесущие (модуляция — QPSK).

За преамбулой следует управляющий заголовок кадра — один OFDM-символ с модуляцией BPSK и стандартной схемой кодирования (скорость кодирования — 1/2). Он содержит так называемый префикс кадра нисходящего канала (DLFP — Downlink Frame Prefix), который описывает профиль и длину первого (или нескольких начальных) пакета в DL-субкадре.

В первый пакет входят широкополосные сообщения (предназначенные всем АС) — карты расположения пакетов DL-MAP, UL-MAP, дескрипторы нисходящего/восходящего каналов DCD/UCD, другая служебная информация. Каждый пакет обладает своим профилем (схема кодирования, модуляция и т. д.) и передается посредством целого числа OFDM-символов. Точки начала и профили всех пакетов, помимо первого, содержатся в DL-MAP.

Восходящий субкадр содержит интервал конкурентного доступа, включающий периоды для начальной инициализации АС (вхождение в сеть) и для запроса полосы передачи. Далее следуют временные интервалы, назначенные базовой станцией определенным абонентским станциям для передачи. Распределение этих интервалов (точки начала) содержится в сообщении UL-MAP. АС в своем временном интервале начинает трансляцию с передачи короткой преамбулы (один OFDM-символ, использует только четные поднесущие). За ним следует собственно информационный пакет, сформированный на MAC-уровне.

Длительность кадров в режиме OFDM может составлять 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 и 20 мс. Заданный базовой станцией, период следования кадров не может изменяться, поскольку в этом случае потребуется ресинхронизация всех АС.

11.5.3. Особенности запроса канальных ресурсов

Запрос на установление соединения не отличается от общепринятого в стандарте IEEE 802.16, за исключением дополнительного режима «концентрированного» запроса (Region-Focused). Он предназначен

только для станций, способных работать с отдельными субканалами. В этом режиме в интервалах конкурентного доступа (заданных в UL-MAP) АС может передать короткий 4-разрядный код на одном из 48 субканалов, каждый из которых включает четыре несущие. Всего предусмотрено восемь кодов. Таблица кодов и подканалов приведена в тексте стандарта IEEE 802.16. Код и номера канала АС выбирает случайным образом.

Получив кодовое сообщение, БС предоставляет АС интервал для передачи «обычного» запроса на предоставление доступа (специального заголовка запроса), если это возможно. Однако, в отличие от других механизмов, БС в UL-MAP не указывает идентификатор запрашившей ее станции, а приводит номера кода запроса, подканала, а также порядковый номер интервала доступа, в течение которого был передан запрос. По этим параметрам АС и определяет, что интервал для запроса полосы передачи предназначен именно ей. Выбор момента для передачи 4-разрядного кода запроса доступа происходит случайным образом, по описанному выше алгоритму обращения к каналу конкурентного доступа.

Отметим, что в режиме OFDM канальный ресурс может предоставляться не только во временной области, но и в отдельных подканалах (группах подканалов), если БС и абонентские станции поддерживают такую возможность. Одно из наиболее важных применений такой опции — Mesh-сеть.

11.5.4. Mesh-сеть

Формально Mesh-сеть — это вид топологии сети IEEE 802.16 в режиме OFDM, и ее физический уровень — это OFDM. Однако различия Mesh-сети с уже рассмотренными режимами проявляются не только, да и не столько на физическом уровне. Mesh-сеть характеризуется тем, что ее узлы обеспечивают сквозную передачу (ретрансляцию) трафика. Поэтому основное отличие Mesh-сети в том, что если в рассматриваемой до сих пор архитектуре «точка-многоточка» АС может общаться только с БС, то в Mesh-сети возможно взаимодействие непосредственно между АС. Соответственно Mesh-сети воплоти в IEEE 802.16 вовсе не в целях создания одноранговых локальных сетей — для этого есть стандарты группы IEEE 802.11. Причина в ином — необходим инструмент построения широкополосной сети, в которой трафик может передаваться по цепочке из нескольких станций, ликвидируя тем самым проблемы передачи при отсутствии прямой видимости. Поэтому и все механизмы управления, в при-

цине позволяющие построить децентрализованную распределенную сеть, ориентированы все же на древовидную архитектуру (корневой узел — БС) с выделенной базовой станцией и доминирующими потоками БС-АС.

Топология сети



Рис. 11.15. Пример Mesh-сети

В Mesh-сети все станции (узлы) формально равноправны. Однако практически всегда присутствует один узел, через который происходит обмен трафика Mesh-сети с внешним окружением (рис. 11.15). Такой узел называют базовой станцией Mesh-сети, именно на него возлагается часть необходимых для управления Mesh-сетью функций. При этом управление доступом может происходить либо на основе механизма распределенного управления, либо централизованным способом под управлением БС. Возможна и комбинация

этих методов.

Базовое понятие в Mesh-сети — соседи. Под соседями определенного узла понимают все узлы, которые могут устанавливать с ним непосредственное соединение. Все они образуют соседское окружение. Узлы, связанные с заданным узлом через соседские узлы, называют соседями второго порядка. Могут быть соседи третьего порядка и т. д.

В Mesh-сети нет понятия восходящих/нисходящих каналов. Весь обмен происходит посредством кадров. Станции передают сообщения либо в отведенные им временные интервалы (в соответствии с предшествующим назначением каналов), либо на основе конкурентного доступа. Каждый узел имеет уникальный 48-разрядный MAC-адрес. Кроме того, для идентификации внутри Mesh-сети станциям присваивается 16-разрядный сетевой идентификатор. Каждый узел постоянно хранит список данных обо всех своих соседях (с указанием удаленности, сектора для направленной антенны, примерной необходимой мощности передатчика для связи, задержки распространения сигнала и т. п.) и транслирует его в сеть с заданной периодичностью. На основании совокупности этих списков от каждого из узлов и происходит управление сетью.

Структура кадров и конфигурирование сети

Кадр Mesh-сети делится на управляющий субкадр и субкадр данных (рис. 11.16). Длина управляющего субкадра — переменная величина, задаваемая БС. Управляющий субкадр представляет собой набор пакетов MAC-уровня, с тем отличием, что сразу после общего заголовка MAC-пакета следует подзаголовок Mesh-сети. Управляющий субкадр в зависимости от реализуемой функции может быть двух типов — управления сетью (network control) и управления очередностью доступа к каналам связи (schedule control). В субкадрах управления всегда используется модуляция QPSK со скоростью кодирования 1/2.

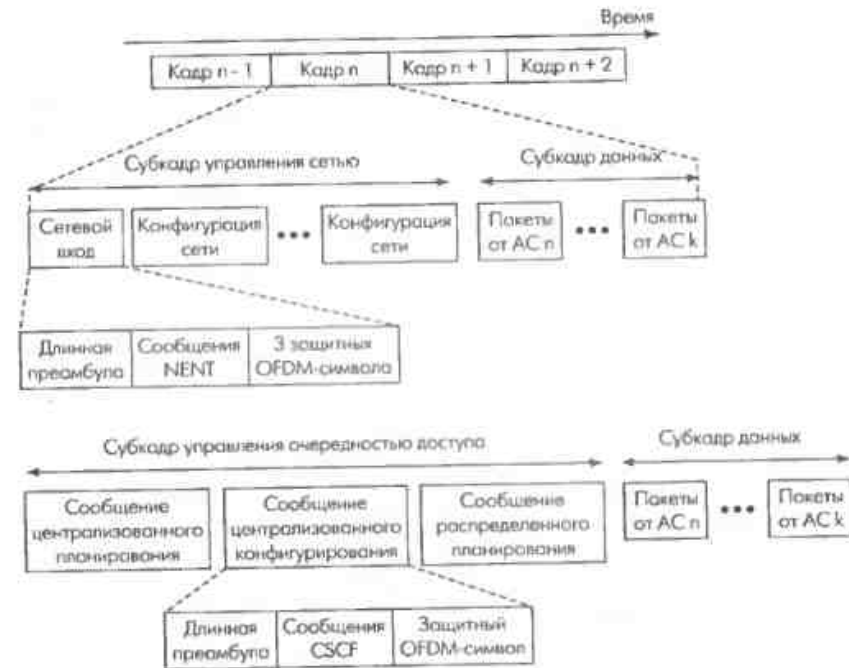


Рис. 11.16. Структура кадра Mesh-сети

Субкадры управления включают интервалы для подключения к сети новых устройств (Network entry — «сетевой вход») и следующие за ними сообщения «конфигурация сети». Сообщения типа «конфигурация сети» содержат всю необходимую информацию о составе сети. Они же реализуют процедуры управления. Эти сообщения генерирует каждый узел и транслирует по сети через свое соседское

окружение. Среди передаваемой информации — списки соседей каждого узла, идентификационный номер БС и число ее соседей, номер логического канала для передачи графика доступа к каналам, удаленность узла (ранг соседства) от БС и т. д. Посредством таких сообщений с заданной периодичностью транслируется дескриптор сети — таблица, полностью описывающая текущие параметры сети. Она содержит такие параметры, как длительность кадров, длина управляющего субкадра, число интервалов для сообщений децентрализованного распределения ресурсов, периодичность следования субпакетов распределения ресурсов, профили пакетов, тип кодирования, соответствие логических каналов физическим и т. п. Дескриптор сети передается от базовой станции ее соседскому окружению, от него — узлам со следующим рангом соседства и т. д. Периодичность передачи дескриптора сети нормирована.

«Сетевой вход» — это интервал, в течение которого новый узел может послать сообщение (NENT) о своем намерении подключиться к сети (аналог интервала конкурентного доступа в сети «точка-многоточка»). Перед этим он должен принять сообщение о конфигурации сети, выбрать узел для подключения, синхронизироваться с ним и лишь затем отправлять запрос. В ответ узел либо откажет в доступе, либо назначит новому узлу сетевой идентификатор, канал и временной интервал для проведения процедур аутентификации.

Методы управления каналными ресурсами

Распределение каналных ресурсов в Mesh-сети может быть централизованным и децентрализованным (распределенным). В свою очередь, децентрализованное распределение бывает координированным с БС и некоординированным.

Децентрализованное распределение ресурсов подразумевает, что распределение происходит в пределах одной группы соседей (т. е. между станциями, способными непосредственно связываться друг с другом). При координированном децентрализованном распределении узлы обмениваются между собой специальными сообщениями управления распределением (distributed scheduling — DSCH). DSCH-сообщения — это запросы на получение ресурса и ответные сообщения с предоставлением (подтверждением) свободного ресурса (временного интервала в субкадре данных). Ресурс предоставляется соседом под конкретное соединение.

Координированность заключается в том, что период выдачи таких сообщений каждой станцией определен и известен ее соседям. Координированные DSCH-сообщения передаются в субкадрах управ-

ления очередностью доступа в оговоренных в сетевом дескрипторе интервалах. Некоординированные DSCH-сообщения передаются в субкадре данных.

Централизованное распределение ресурсов подразумевает древовидную топологию сети с БС в вершине. Оно реализовано посредством двух типов сообщений — централизованного конфигурирования CSCF и централизованного планирования CSCH. Эти управляющие сообщения размещаются в начале субкадра управления графиком доступа. Используя сообщения централизованного планирования CSCH, каждый узел определяет потребность в трафике своих дочерних узлов (т. е. трафик которых от/к БС проходит через данный узел) и сообщает свою потребность вышестоящему узлу, вплоть до БС. Проанализировав потребность, БС рассылает сообщение CSCH, информируя каждый узел о выделенной ему полосе пропускания (в бит/с) в восходящем и нисходящем направлениях. Исходя из этих данных каждый узел уже сам запрашивает (или назначает) расположение пакетов в субкадре данных у (дли) своих соседских узлов посредством сообщений децентрализованного планирования DSCH.

Сообщения централизованного конфигурирования CSCF формируются БС и транслируются по сети для информирования всех ее узлов о текущем состоянии. CSCF включает такую информацию, как число доступных логических каналов и их перечень, перечень узлов в сети с указанием числа дочерних узлов для каждого из них, а также профили восходящих/нисходящих пакетов для каждого дочернего узла.

11.6. Режим OFDMA

Режим OFDMA с точки зрения формирования модуляционных символов аналогичен OFDM. Различие проявляется в принципе разделения каналов. Один логический OFDMA-канал образован фиксированным набором несущих, как правило, распределенных по всему доступному диапазону частот физического канала. В упрощенном виде этот механизм опционально используется в режиме OFDM — вспомним разбиение канала на 16 подканалов. Ширина физического канала (BW) не нормирована (в стандарте говорится «не менее 1 МГц»), но в реальных применениях вряд ли окажутся эффективными каналы менее 5 МГц.

11.6.1. Особенности формирования символов и канального кодирования

В OFDMA несущих значительно больше — 2048, соответственно и число подканалов становится достаточным для организации работы сети: в разных режимах их от 32 до 70, по 24 или 48 информационных несущих в каждом. Системная тактовая частота — $8/7$ BW.

Метод формирования, структура OFDM-символов и механизм канального кодирования в OFDMA схожи с описанным для OFDM. Канальное кодирование включает рандомизацию, помехоустойчивое кодирование, перемежение и модуляцию. Метод рандомизации также практически идентичен OFDM (различны способы формирования инициализирующего вектора генератора ПСП).

Помехоустойчивое кодирование в OFDMA в качестве обязательного предусматривает только сверточный кодер — такой же, как в OFDM, и с тем же набором скоростей кодирования. Кодера Рида-Соломона нет. Опционально предусмотрено применение блочных и сверточных турбокодов. Метод перемежения также идентичен с OFDM — надо лишь в соответствующих формулах (11.1) заменить 12 (для OFDM) на 16.

Схемы модуляции несущих полностью совпадают с OFDM, с той лишь разницей, что предусмотренный набор включает только QPSK и 16-QAM со скоростями кодирования $1/2$ и $3/4$, а также опционально 64-QAM со скоростями кодирования $1/2$, $2/3$ и $3/4$. Однако в OFDMA после формирования символов квадратурной модуляции и усреднения их амплитуд (нормировке на параметр c) последовательность символов на каждой несущей умножается на бинарную ПСП w_k , схема генератора которого идентична приведенной на рис. 11.13. Каждая k -я несущая умножается на значение $1 - 2w_k$ (т.е. если $w_k = 0$, то $1 - 2w_k = 1$ и символ не изменяется; если $w_k = 1$, символ умножается на -1). Символы пилотных несущих модулируются методом BPSK, их значения вычисляются как $c_k = 1 - 2w_k$. Поскольку мощность сигналов пилотных несущих в нисходящем канале (опционально — и в восходящем) должна быть на 2,5 дБ выше средней мощности информационных несущих, значение c_k дополнительно умножается на $4/3$.

11.6.2. Структура кадров, методы распределения несущих

Структура кадров (рис. 11.17) в OFDMA схожа со всеми рассмотренными режимами в том, что сохраняется подразделение на вос-

ходящий и нисходящий субкадры, как временное, так и частотное. Длительность кадра может составлять 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 и 20 мс. Кадр — это последовательность OFDMA-символов. Каждый OFDMA-символ включает набор подканалов. Пакеты данных могут передаваться одновременно, на различных OFDMA-подканалах.

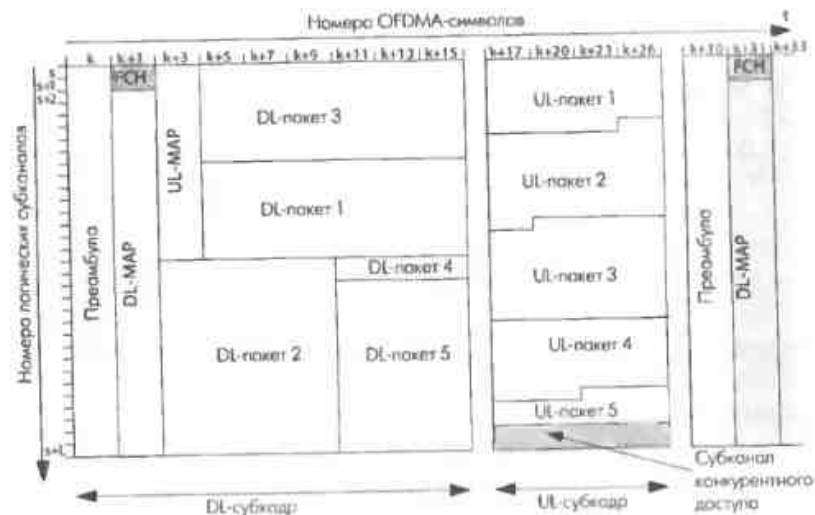


Рис. 11.17. Структура OFDMA-кадра

Для описания структуры кадра в OFDMA используется понятие слота — минимального ресурса для передачи данных. Слот занимает один подканал и от одного до трех последовательных OFDMA-символов. В нисходящем субкадре длительность слота — один символ в режиме FUSC, два — в режиме PUSC; в восходящем субкадре длительность слота всегда равна трем OFDMA-символам.

Подканал — это набор несущих частот (как и в OFDM). Распределение несущих по подканалам, равно как и число несущих на один подканал, зависит от направления передачи и метода распределения несущих. Стандарт IEEE 802.16 описывает несколько способов распределения несущих как в нисходящем канале, так и в восходящем. Принципиально они подразделяются на FUSC (full usage of the subchannels) — полное использование подканалов передатчиком БС и PUSC (partial usage of subchannels) — использование групп подканалов (сегментов), т.е. не всего доступного диапазона. Какие именно подканалы используются в режиме PUSC, однозначно определяют номера сегментов.

В методах PUSC и FUSC (и их вариациях) одному субканалу присваиваются несущие, равномерно распределенные по всему доступному физическому каналу. Используется и другой подход — применение в подканалах набора соседних поднесущих частот. Он реализован в методе AMC (Advanced modulation and coding), предназначенном для работы с адаптивными антенными системами.

В методе AMC используется также 2048 несущих. Из них 160 нижних и 159 верхних образуют защитные интервалы, центральная частота не используется. Оставшиеся несущие последовательно разбиваются на 192 группы (группа именуется bin) по 9 несущих в каждой. Центральная (пятая) частота в каждой группе — пилотная. Четыре смежные группы образуют полосу. AMC-подканал использует либо одну группу в шести последовательных по времени OFDM-символах, либо две группы в трех OFDM-символах. Структура AMC-подканалов в восходящем и нисходящем субкадрах одинакова. При этом перестановки поднесущих происходят в пределах субканала (опциональный механизм перестановок соседних поднесущих).

Отметим, что в пределах одного субкадра возможно использование различных механизмов распределения несущих по подканалам — FUSC, PUSC, AMC и т. д. Границы соответствующих зон (именуемых в стандарте «зонами перестановки» — permutation zone) определены в картах субкадров (рис. 11.18).

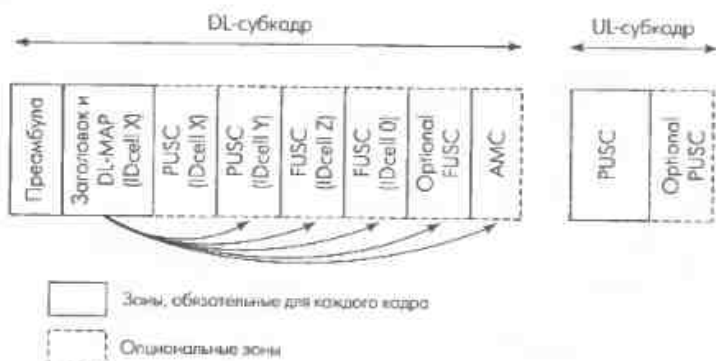


Рис. 11.18. Совмещение различных «зон перестановки» в OFDMA-кадре

11.6.3. Нисходящий OFDMA-канал

В нисходящем канале (рис. 11.17) первый символ — это преамбула. Несущие преамбулы модулируются посредством BPSK специаль-

ным псевдослучайным кодом, зависящим от используемого сегмента (в режиме PUSC) и переменной IDcell, задаваемой на MAC-уровне. Одному сегменту с номером $n = [0..2]$ соответствует набор несущих с шагом 3 и начальным сдвигом n . Распознав тип преамбулы, АС сразу определяет значение переменной IDcell и режим работы БС.

За преамбулой следуют два символа, передающие заголовок кадра FCH и карту распределения нисходящего поля нисходящего канала DL-MAP. Заголовок транслируется посредством QPSK со скоростью кодирования 1/2. Он содержит префикс нисходящего канала (DL Frame prefix), в котором указываются используемые сегменты, и параметры карты нисходящего канала (длина, используемый метод кодирования и число повторений), транслируемой сразу за заголовком кадра. Также в заголовке используется флаг, установка которого означает, что в восходящем субкадре по отношению к предыдущему кадру изменилось расположение области конкурентного доступа.

Далее транслируется карта восходящего канала UL-MAP и нисходящие пакеты данных для разных АС.

Режим FUSC означает, что используется весь диапазон физического канала (все возможные несущие). Это 1702 несущие частоты, еще 173 и 172 несущих вверху и внизу диапазона соответственно образуют защитные интервалы. Центральная частота с индексом 1024 не используется.

В режиме FUSC прежде всего выделяются пилотные частоты. Они подразделяются на фиксированные и переменные. Списки тех и других приведены в стандарте. Термин «переменные пилотные частоты» означает, что в каждом четном OFDMA-символе их индексы соответствуют приведенным в документе IEEE 802.16, в каждом нечетном — увеличиваются на 6 (нумерация OFDMA-символов начинается с 0). Всего предусмотрено 166 пилотных частот, из них 24 — фиксированные. И фиксированные, и переменные пилотные частоты разбиты на два набора, одинаковые по объему. Это разбиение имеет значение только при работе с адаптивными антенными системами в режиме пространственно-временного кодирования (STC).

После назначения пилотных частот оставшиеся на $N_{subchannels} = 32$ подканала по $N_{subcarriers} = 48$ несущих в каждом. Назначение информационных несущих подканалам происходит в соответствии с формулой

$$subcarrier(k, s) = N_{subchannels}n_k + \{P[(s + n_k) \bmod N_{subchannels}] + IDcell\} \bmod N_{subchannels}, \quad (11.2)$$

где $subcarrier(k, s)$ — индекс несущей k в подканале s ,

$$s = [0 \dots N_{subchannels} - 1], \quad k = [0 \dots N_{subcarriers} - 1],$$

$$n_k = (k + 13s) \bmod N_{subcarriers}.$$

IDCell — определяемый на MAC-уровне идентификатор отдельного сегмента БС (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). $P(x)$ означает x -й элемент последовательности перестановок $\{P\}$, приведенной в стандарте ($P = \{3, 18, 2, 8, 16, 10, 11, 15, 26, 22, 6, 9, 27, 20, 25, 1, 29, 7, 21, 5, 28, 31, 23, 17, 4, 24, 0, 13, 12, 19, 14, 30\}$). Операция $x \bmod k$ означает остаток от x/k .

Очевидно, что перед применением приведенной формулы информационные несущие должны быть перенумерованы так, чтобы их индексы укладывались в диапазон 0–1535 (последнее значение соответствует физическому индексу 1702), т.е. пронумерованы подряд, без учета пилотных частот. Поскольку в четных и нечетных символах расположение пилотных частот различно, распределение информационных несущих для них также нужно вычислять независимо.

В режиме PUSC весь доступный диапазон подканалов делится на ряд независимых сегментов. Для работы используется часть из них, но не менее 12 подканалов. Всего в режиме PUSC может быть 60 подканалов. Они разбиты на шесть неравных сегментов. Из них три базовых (сегменты 0, 1 и 2), каждый включает 12 подканалов (0–11, 20–31 и 40–51 подканалы соответственно).

Символ в режиме PUSC формируется по следующему принципу. Всего предусмотрено 2048 частот, из них центральная (с индексом 1024) и защитные (184 нижние и 183 верхние) не используются. Оставшиеся 1680 несущих последовательно разбивают на 120 кластеров, каждый содержит 14 несущих. После чего последовательные физические кластеры (PhysicalCluster) перенумеровываются в «логические» в соответствии с формулой

$LogicalCluster =$

$$= RenumberingSequence((PhysicalCluster + 13IDCell) \bmod 120),$$

где $RenumberingSequence(x)$ — соответствующий элемент приведенной в стандарте IEEE 802.16 последовательности перестановок; IDCell — определяемый на MAC-уровне идентификатор отдельного сегмента БС (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). Эта операция фактически означает распределение последовательных групп несущих по всему диапазону физического канала. Далее логические кластеры разбиваются на шесть групп (0–23, 24–39, 40–63, 64–79, 80–103, 104–119) по 24 и 16 кластеров. Большие

группы соответствуют большим сегментам (по умолчанию, группа 0 соответствует сегменту 0, группа 2 — сегменту 1, группа 4 — сегменту 2). В каждом кластере определяются пилотные несущие: для четных символов это 5-я и 9-я несущие, для нечетных — 1-я и 13-я (рис. 11.19).



Рис. 11.19. Структура кластера

После того как пилотные несущие определены, информационные несущие в сегменте нумеруются подряд, не учитывая пилотные частоты. Затем несущие распределяются по подканалам: в соответствии с формулой (11.2) каждому подканалу назначаются по 24 несущих. Распределение происходит в рамках отдельных сегментов, объединяющих 8 или 12 подканалов. Поэтому в формуле (11.2) используются значения $N_{subchannels} = 12$ или 8, $N_{subcarriers} = 24$, а также специальные перестановочные последовательности P_{12} и P_8 для сегментов из 12 и 8 подканалов, приведенных в стандарте.

В стандарте предусмотрены и опциональные методы распределения несущих, в частности, так называемый optional FUSC, принципиально не отличающийся от рассмотренного.

11.6.4. Восходящий канал

Восходящий субкадр следует непосредственно за нисходящим через интервал TTG. Он содержит пакеты от абонентских станций и интервал для запроса доступа/инициализации. Минимальный размер одного сообщения в восходящем подкадре (слот) — 3 OFDMA-символа в одном подканале. Это привело к появлению в документе IEEE 802.16 термина «фрагмент» (мозаичный элемент, tile).

«Фрагмент» представляет собой совокупность трех символов и четырех несущих, в котором положения пилотных частот жестко определены (рис. 11.20).

В восходящем канале весь частотный диапазон канала (1680 несущих) разбивается на 420 последовательных «фрагментов», по четыре

несущие в каждом. Предусмотрено 70 подканалов. Каждый из них включает шесть «фрагментов», т. е. 24 несущие на символ в одном подканале. Распределение «фрагментов» по подканалам происходит следующим образом. Все 420 «фрагментов» разбиваются на шесть групп по 70 «фрагментов». В каждый подканал включается по одному «фрагменту» из каждой группы в соответствии с уравнением

$$Tile(n, s) = 70n + \{P[(n + s) \bmod 70] + UL_IDcell\} \bmod 70,$$

где $Tile(n, s)$ — «фрагмент» n подканала s ; $n = [0..5]$; $s = [0..69]$, $P(x)$ — перестановочная последовательность; UL_IDcell — переменная в диапазоне 0–69, задаваемая БС на MAC-уровне. В результате каждому подканалу в каждом символе назначается свой набор несущих.



Рис. 11.20. Структура «фрагмента» восходящего канала



Рис. 11.21. Структура «фрагмента» восходящего канала в опциональном режиме

После распределения по подканалам происходит нумерация информационных несущих в каждом слоте — всего их 48 в трех символах. Информационные частоты нумеруются в подканале начиная с наименьшей несущей «фрагмента» с наименьшим индексом — сначала в первом символе, затем во втором и третьем. После чего информационные несущие в каждом слоте перенумеровываются в соответствии с формулой $subcarrier(n, s) = (n + 13s) \bmod 48$, где s — номер подканала; $n = [0..47]$ (т. е. происходит циклический сдвиг нумерации информационных несущих на $13s$ в каждом подканале s).

Отметим, что в тексте документа IEEE 802.16 происходит подмена терминов: подканалом в восходящем субкадре авторы текста IEEE 802.16 называют именно слот, информационную структуру размером 24 несущих на три символа. И когда в документе написано, что в субканале 48 информационных несущих, следует помнить, что с точки зрения правильной терминологии речь идет не о субканале, а о слоте. Реальных же несущих (т. е. физических частот) в субканале всего 24. Умножая их на 3 (число OFDMA-символов в слоте) и вычитая 24 пилотные несущие, как раз и получим 48 информационных несущих.

Опционально в восходящем канале предусмотрен режим, в котором во «фрагменте» одна пилотная частота (рис. 11.21), шесть «фрагментов» на подканал, всего 96 подканалов (1728 используемых частот).

11.6.5. Запрос полосы и регистрация в сети

Механизмы запроса начальной инициализации в сети и первичного запроса полосы пропускания в режиме OFDMA схожи и принципиально отличаются от других режимов. Для этих запросов в OFDMA используется специально выделенный канал. Он назначается БС и состоит из шести последовательных подканалов, индексы которых приведены в UL-MAP. Запрос представляет собой 144-разрядный CDMA-код, передаваемый посредством BPSK, т. е. 1 бит на несущую. В результате для передачи такого кода достаточно шести подканалов (24 информационных несущие в каждом). Сам код формируется в генераторе ПСП 15-разрядном сдвиговом регистре с задающим полиномом $1 + X^4 + X^5 + X^7 + X^{15}$. Старшие шесть разрядов вектора инициализации генератора ПСП равны переменной UL_IDcell , остальные девять — константы. Номер кода определяется начальной точкой (т. е. числом тактов генератора ПСП после инициализации) — всего предусмотрено 256 кодов. Причем БС использует только часть из всех возможных кодов — сначала N кодов начальной инициализации, за ними следует M кодов периодического определения параметров АС, далее L кодов запроса полосы. Для каждой БС задается точка начала этой последовательности кодов.

Начальная инициализация происходит так: АС, приняв дескриптор восходящего канала и UL-MAP, определяет набор CDMA-кодов и посылает в отведенном интервале случайно выбранный код из N возможных. Один и тот же код триплексируется в двух последовательных OFDMA-символах. Если продолжительность канала конкурентного доступа составит более одного слота, АС может отправить CDMA-код в четырех последовательных символах, причем коды должны быть смежными (т. е. следовать в ПСП один за другим).

Успешно приняв и расшифровав CDMA-код (а это может и не произойти, поскольку в интервале конкурентного доступа возможны коллизии при одновременной работе передатчиков нескольких АС), базовая станция не знает, от какой АС пришел запрос. Поэтому в ответ в UL-MAP следующего кадра она указывает номер принятого CDMA-кода, субканал и символ, в котором код был отправлен. Так АС определяет, что ее запрос принят и следующее за UL-MAP

широковещательное сообщение с указанием диапазона для запроса (номера символа, подканала и длительности) предназначено именно ей. В этом сообщении БС передает необходимые параметры для процесса инициализации в сети (включая идентификатор соединения CID, присвоенный MAC-адрес, набор физических параметров и др.). Далее в указанный в UL-MAP интервал АС приступает к штатной процедуре регистрации в сети.

Первичный запрос полосы в методе OFDMA может происходить двумя способами — посредством заголовков запроса полосы, как и в остальных режимах, и путем посылки CDMA-кода запроса полосы в интервале конкурентного доступа. Посылка кода запроса полосы (равно как и кода периодического измерения параметров) происходит в одном OFDMA-символе. Возможна и посылка трех последовательных кодов в трех символах (какой из вариантов необходимо использовать, указывается в UL-MAP). Приняв CDMA-код, БС в UL-MAP повторяет его номер и параметры, а также сообщает интервал для отправки заголовка запроса полосы уже обычным способом.

11.7. Поддержка адаптивных антенных систем

Важнейшая особенность стандарта IEEE 802.16, принципиально отличающая его, скажем, от стандартов IEEE 802 a/b/g, — это наличие встроенных средств поддержки адаптивных антенных систем (AAS). Подробно подобные системы описаны в монографии [7]. Разумеется, применение AAS — не обязательное требование стандарта. AAS — это системы с секторными направленными антеннами (метод формирования диаграмм направленности антенн в стандарте не оговаривается), т. е. антенные системы с несколькими антенными элементами. Применение AAS существенно увеличивает потенциальную емкость сети стандарта IEEE 802.16, поскольку в разных секторах БС возможна работа в одних и тех же каналах (частотных и OFDMA). Кроме того, направленные антенны позволяют существенно уменьшать общую излучаемую мощность. В результате снижается и межканальная интерференция. Не менее важно применение многоэлементных антенных систем для улучшения прохождения сигналов в каналах с замираниями, так называемых методов пространственно-временного кодирования (разнесения) STC.

Поддержка ASS в спецификации IEEE 802.16 означает модификацию протоколов на физическом и MAC-уровнях, наличие специ-

альных управляющих и контролирующих сообщений для работы с адаптивными антеннами.

11.7.1. Работа с направленными AAS

Стандарт допускает в рамках одного кадра транслировать как неадресованный, так и адресованный (посредством AAS) трафик (рис. 11.22). Для разграничения зон не-AAS и AAS-трафика используются специальные сообщения. Принцип работы с AAS в режимах OFDM и OFDMA, равно как и в SCa, достаточно схож. Наиболее полно он описан в стандарте для случая OFDMA, поэтому остановимся именно на нем. В режиме AAS возможно два механизма выделения каменных ресурсов — сканирование карт (Diversity-Map Scan) и прямая сигнализация (Direct Signaling)



Рис. 11.22. Структура кадров с зоной AAS

Механизм Diversity-Map Scan

В режиме OFDMA предусмотрено два метода работы с AAS — с распределенными несущими (FUSC, PUSC) и с соседними несущими (AMC). Каждый из методов в начале AAS-зоны предусматривает передачу OFDMA-символа преамбулы AAS-зоны и заголовка с префиксом AAS-зоны. Для передачи этих сообщений в AAS-зоне нисходящего субкадра выделены специальные подканалы (два старших для FUSC/PUSC и четвертый с начала и четвертый с конца подканалы в AMC). Сообщения в этих подканалах могут повторяться несколько раз, с тем что, если используется не широкополосная трансляция, а передача с переключением лучей, сообщения с префиксом дошли бы до всех АС. В префиксе указывается код луча антенны, тип и размеры преамбулы ASS-зоны (в восходящем и нисходящем каналах), область для начальной инициализации/запросов полосы, а также области в кадре для каждого AAS-соединения. Префикс, как и в штатном режиме, передается посредством QPSK со скоростью кодирования 1/2 и двукратным повтором (в пределах одного символа). Основное назначение префикса — сообщить АС о том, как будут переданы карты UL/DL-каналов для разделенных по

направлениям лучей групп пользователей (очевидно, что распределение каналовых ресурсов может происходить независимо в каждом луче).

Для работы в режиме AMC-AAS кадры могут объединяться в суперкадр длительностью не менее 20 обычных кадров. В суперкадр входит по крайней мере один широкополосный кадр, содержащий дескрипторы и карты DL/UL-каналов. Смысл такого объединения — обеспечить минимум управляющих сообщений для группы кадров.

Method Direct Signaling

Метод прямой сигнализации (Direct Signaling Method) использует механизм последовательного распределения несущих AMC. Прямая сигнализация требует точной пространственной селекции каналов, но позволяет увеличить емкость системы связи.

Особенность метода — в каждом кадре в AAS-зоне выделяется от одного до четырех каналов доступа/распределения ресурсов (BWAA — bandwidth allocation/access). Каждый BWAA-канал состоит из двух субканалов, расположенных в верхней и нижней частях диапазона симметрично относительно центральной частоты (если BWAA-канал один, то он включает самый верхний и самый нижний подканалы). В этом канале передаются префикс входящего субкадра (для режима Direct Signaling Method), карты UL-MAP и DL-MAP для каждой из пространственно разделенных AC или групп AC. Благодаря точной пространственной настройке AAS данный метод позволяет в одном кадре передавать сообщения множеству пользователей.

В методе прямой сигнализации предусмотрены четыре специальных кодовых сообщения — настройка (обучение) обратного соединения RLT (reverse link training), доступ в обратном соединении RLA (reverse link access), настройка прямого соединения FLT (forward link training) и иницирование прямого соединения FLI (forward link initiation). Первые два сообщения использует AC, вторые два — BC. Для начальной инициализации или запроса полосы AC посылает сообщение RLA в канале BWAA. Оно предшествует сообщениям запроса полосы или начального доступа и используется BC для точной настройки своей антенной системы на данную AC. В ответ BC передает сообщение FLI — уникальный код для каждой AC (BC может сама иницировать соединение, посылв FLI). FLI транслируется в подканале, выделенном для данной AC. Каждая абонентская станция сканирует все подканалы и, обнаружив по кодовой последовательностью адресованное ей сообщение начальной инициализации,

отправляет в ответ в том же самом канале (в отведенном для нее временном интервале) последовательность RLT, предназначенную для точной настройки антенн BC на AC в данном подканале. В результате, выполнив все необходимые подстройки, BC и AC устанавливают соединение, в течение которого происходит обмен данными. Причем пакетам данных предшествуют настроенные последовательности FLT (со стороны BC) и RLT (со стороны AC).

11.7.2. Пространственно-временное кодирование

Еще одна важная особенность применения многоэлементных антенных систем — это возможность использовать пространственно-временное разнесение передающих каналов (Space-Time Coding, STC) для улучшения прохождения радиосигналов. Идея метода — разнести, пространственно и во времени, источник одного и того же сигнала, т.е. несколько изменить условия его прохождения. Вероятность безошибочного приема такого сигнала (после соответствующей первичной обработки в приемнике) существенно возрастает.

В стандарте IEEE 802.16 используется схема пространственно-временного разнесения, предложенная Аламути [46]. Суть метода проста — выходной поток символов разбивается на два (например, четные и нечетные символы), формируемые параллельно (рис. 11.23). В передатчике используется два антенных канала, действующих параллельно и использующих общий тактовый генератор (что обеспечивает синхронность). Таким образом, реализуется так называемая схема канала MISO (Multiple Input Single Output) — несколько входов и один выход (по отношению к каналу).

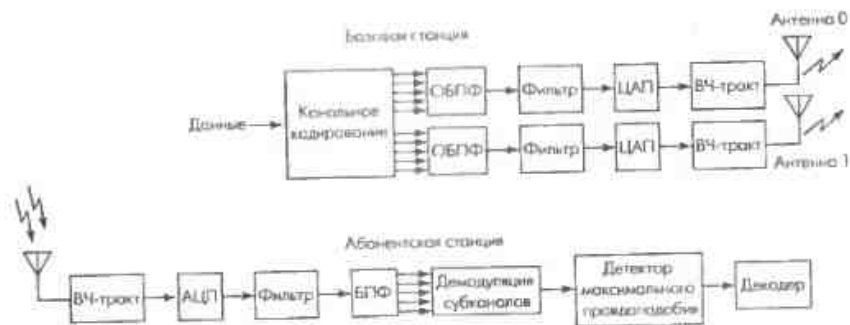


Рис. 11.23. Метод пространственно-временного кодирования по схеме MISO

Сначала антенна 0 транслирует символ S_0 , антенна 1 — символ S_1 . В следующий символичный интервал антенна 0 передает символ $-S_1^*$, антенна 1 — символ S_0^* (S^* означает комплексное дополнение к S). Приемник работает с одной антенной и в каждом символическом интервале принимает сигналы r_0 и r_1 . Зная передаточные характеристики каналов (h_0 и h_1), в приемнике можно восстановить переданные сигналы S_0 и S_1 согласно формулам (разумеется, вычисленные значения являются некоторым приближением к исходным значениям S_0 и S_1):

$$S_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*; \quad S_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^*.$$

С точки зрения протоколов физического уровня применение STC не требует особых действий. Зона, транслируемая посредством STC, помечается в DL-MAP каждого юзера.

Особенности STC в методе OFDMA

В методе OFDMA предусмотрен ряд особенностей реализации STC. Прежде всего, при формировании OFDMA-символов набор пилотных частот зависит от четности символа и номера антенного канала. Кроме того, в OFDMA в дополнение к пространственно-временному разнесению используется и частотное посредством частотных скачков (frequency hopping diversity coding — FHDC). Суть данного механизма: допустим, несущие в субканале X модулируются сигнальным вектором S_0 , в субканале $X+1$ — вектором S_1 . Именно такой сигнал передает антенна 0. Антенна 1 транслирует сигнал, в котором несущие подканала X модулируются вектором $-S_1^*$, несущие подканала $X+1$ — вектором S_0^* . Восстановление в приемнике происходит аналогично рассмотренному варианту STC, только вместо передаточных характеристик двух антенных каналов используются характеристики, связанные с подканалами X и $X+1$ (т. е. с наборами несущих этих подканалов). Под принятыми сигналами r_0 и r_1 понимают принятые сигналы в подканалах X и $X+1$ соответственно. Из них восстанавливают S_0 и S_1 .

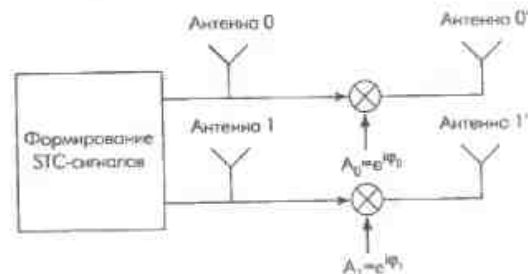
Очевидно, что данную методику можно перенести на пары субканалов, т. е. все подканалы OFDMA-символа разбиваются на смежные пары $(X, X+1; Y, Y+1; \dots)$. В антенне 0 они передаются без изменений, в антенне 1 в каждой паре происходит описанное преобразование.

Все изложенные схемы преобразования можно описать матрицей $A = \begin{bmatrix} S_0 & -S_1^* \\ S_1 & S_0^* \end{bmatrix}$. Однако возможна и упрощенная схема: $B = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \end{bmatrix}$,

обеспечивающая, однако, двукратный выигрыш в скорости. Вид матрицы преобразования задается базовой станцией в картах соответствующих каналов.

Метод OFDMA допускает применение STC/FHDC не только в нисходящем, но и в восходящем канале. Кроме того, возможно применение STC на базе не только двух, но и четырех антенных элементов. В последнем случае помимо базовых антенн 0 и 1 (рис. 11.24) добавляются антенны 0' и 1', сигнал в которых смещен по фазе (например, сигнал в антенне 0' $S_0' = S_0 \cdot e^{j\varphi_0}$).

Рис. 11.24. Схема STC с четырьмя передающими антеннами



11.8. Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16

Выше был кратко рассмотрен стандарт IEEE 802.16. Из изложения видно, что спецификация IEEE 802.16 предоставляет создателям аппаратуры достаточно широкие возможности, не оговаривая при этом конкретные способы реализации предусмотренных стандартом алгоритмов и механизмов. Фактически IEEE 802.16, как и положено стандарту, описывает самые общие правила игры, следуя которым возможно производить совместимую аппаратуру. Если эта цель будет достигнута, нас ожидает небывалое оживление рынка средств беспроводного доступа, а также связанных с ним услуг. Доказательство тому — имена лишь некоторых членов WiMax Forum, таких, как Intel, Nokia, Analog Devices, Atheros Communications, Fujitsu Microelectronics America и многие другие. Более того, в низкочастотной области (менее 11 ГГц) некоторые производители уже объявили о создании соответствующей элементной базы.

Видимо, первой свой продукт на этот рынок выпустила канадская фирма Wavesat (www.wavesat.com), еще в феврале 2003 г. анонсировавшая сверхбольшую интегральную схему (СБИС) OFDM-модема

DM110 (рис. 11.25). Он был реализован в ASIC, т. е. методом заказного проектирования, в корпусе типа BGA-1156. Схема обладала возможностями, несколько отличающимися от требований IEEE 802.16 (в чем-то избыточными). Так, поддерживалась модуляция 4-, 16- и 64-QAM, 1024-точечное БПФ, временное и частотное дуплексирование, формирование OFDM-пакетов с защитным кодированием. Допустимая ширина канала — от 3 до 7 МГц, скорость передачи данных — до 35 Мбит/с. Напряжение питания ядра и периферии — 2,5 и 3 В соответственно.

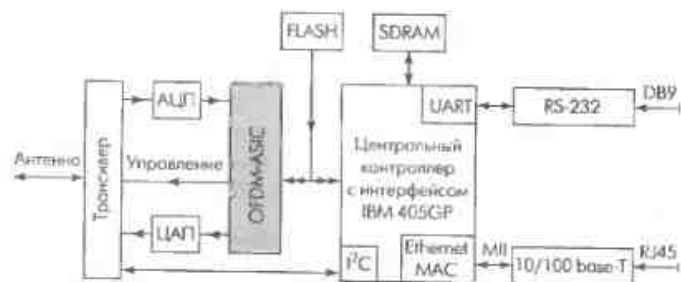


Рис. 11.25. Схема устройства на базе OFDM-модема DM110 компании Wavesat

В декабре 2004 г. фирма Wavesat объявила о начале продаж своего нового однокристалльного OFDM-модема — СБИС DM256. СБИС реализована в корпусе PQFP-208 и принципиально отличается от предшественницы. DM256 оснащена ЦАП и АЦП (10 разрядов). Входной/выходной интерфейс реализован в виде как квадратурных составляющих (I и Q), так и модулированного сигнала на промежуточной частоте 10 МГц. Поддерживается модуляция 2/4/16/64-QAM. В микросхеме реализованы разработанные компанией механизмы временной и частотной синхронизации, поддерживается временное и частотное разделение каналов, в последнем случае — дуплексный и полудуплексный режимы. Ширина канала — 1,75; 3; 7 и 10 МГц, длительность защитного интервала — от 1/4 до 1/32 от длительности OFDM-символа. На аппаратном уровне поддерживается кодек Рида-Соломона и декодер Витерби. Для построения оборудования на базе DM256 дополнительно необходим лишь ВЧ-трансмисмиттер и контроллер MAC-уровня. СБИС может использоваться как в БС, так и в абонентском оборудовании. Важно отметить, что DM256 поддерживает требования стандарта широкополосного доступа для мобильных приложений IEEE 802.16e.

Если компания Wavesat сосредоточилась на режиме OFDM, то израильская фирма Runicom Technologies (www.runicom.com) выпу-

стила СБИС RN-2234 — модем с поддержкой режима OFDMA стандарты IEEE 802.16 (рис. 11.26). Данная СБИС реализует схемы модуляции QPSK, 16- и 64-QAM. Поддерживаются как турбокоды, так и кодек Рида-Соломона (P-C). Модем включает АЦП (10 бит) и ЦАП (12 бит). При ширине канала 14 МГц СБИС RN-2234 обеспечивает скорость передачи данных до 56 Мбит/с. На аппаратном уровне поддержана возможность работы с AAS, включая режим STC в исходящем канале. СБИС производится по КМОП-технологии уровня 0,18 мкм в корпусе 304 LF BGA (19 × 19 × 1,5 мм). Напряжение питания ядра/периферии — 1,8/3,3 В. Максимальная потребляемая мощность — 2 Вт.

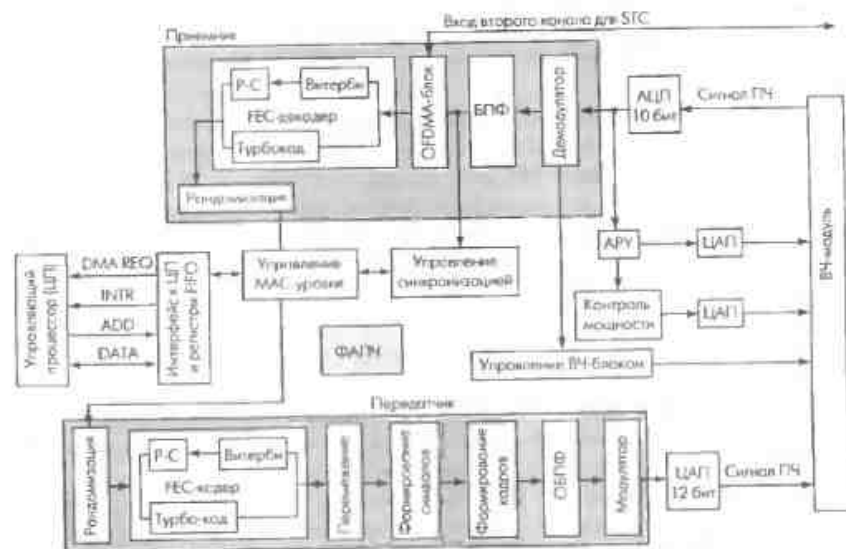


Рис. 11.26. Структура СБИС RN-2234 OFDMA-модема компании Runicom

Не следует забывать, что научная база для практической реализации OFDM-систем впервые была описана российскими учеными [13]. Причем огромный научно-технический потенциал России не утерян и до сих пор. Об этом свидетельствует тот факт, что многие мировые лидеры в области технологии беспроводного оборудования используют коллективы российских разработчиков. Все это позволяет надеяться, что Россия в будущем не только будет полигоном для быстрого и широкомасштабного внедрения WiMax-совместимых систем, но и займет достойное место в мировом разделении рынка по производству таких систем.

Литература

1. Аверин С. Обзор рынка сотовой связи РФ. Итоги 4Q05 и 2005 года // www.sotovik.ru
2. Артамонов А.А., Протопопов Л.Н., Варезин В.А. Первый опыт цифрового наземного ТЕЛЕвещания в России // Телемультимедиа. 2000. № 3.
3. Белов А. Полезные мелочи современной телефонии // Электроника: НТБ. 1999. № 2.
4. Варганов М.Е., Зиновьев Ю.С., Астахов Л.Ю. и др. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов. М.: Радио и связь, 1985.
5. Варезин В., Артамонов А. Сравнительные характеристики европейских и американских стандартов цифрового наземного телевидения // Теле-Спутник. 1999. № 11.
6. Вишневацкий В.М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета // Электросвязь. 2000. № 10. С. 9-13.
7. Вишневацкий В.М., Лягов А.И., Портной С.Л., Шалювич И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.
8. Гольдштейн Б.С. Сигнализация в сетях связи. Т. 1. М.: Радио и связь, 1998.
9. Гольцико А. Большая семья WLL // Мир связи — Connect! 1998. № 5.
10. Грамиков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М.: Мобильные ТелеСистемы — Эко-Трендз, 1997.
11. Кириллов В., Милеев П. Расстояния на миг сократились... (Обзор геостационарных спутниковых систем связи, часть 1) // ТЕЛЕ-Спутник. 1997. № 5(19).
12. Конкурирующие стандарты цифрового телевизионного вещания // Электроника: НТБ. 2001. № 1. С. 17-19.
13. Концепция развития связи РФ / Под ред. В.Б. Булгаков, 1996.
14. Кулк К.И. Цифровое телевидение в России // Электроника: НТБ. 2001. № 3.
15. Кудзарева В. Перспективы развития и преимущества DVB-T в России и странах ближнего зарубежья // www.nat.ru
16. Липатов А., Варужина Л. Обеспечение информационной безопасности в системах DECT // Технологии и средства связи. 1999. № 5.
17. Мейтин М. Bluetooth: устройства всех стран, соединяйтесь! Без проводов // Электроника: НТБ. 2000. № 5.
18. Мейтин М. MPEG как предвестник эры интерактивного телевидения. Там же. 2001. № 4.
19. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005.
20. Неодлов Л. CDMA: технологии доступа // Сети. 2000. № 6.
21. Новаковский С. Последние данные о внедрении телевидения высокой четкости (стандарт ATCS) в США // 625. 2000. № 1.
22. Пат. 3662316 США. Short Base-Band Pulse Receiver / Kenneth W. Robbins. Приоритет 12.03.71.
23. Пат. 3728632 США. Transmission and Reception System for Generation and Receiving Base-Band Duration Pulse Signals without Distortion for Short Base-Band Pulse Communication System / Gerald F. Ross. Приоритет 12.03.71.
24. Пат. 3806795 США. Geophysical Subveying System Employing Electromagnetic Impulses / Rexford M. Morey. Приоритет 3.01.72.
25. Пат. 4641317 США. Spread Spectrum Radio Transmission System / Larry W. Fullerton. Приоритет 3.12.84.
26. Пат. 5677927 США. Ultrawide-Band Communication System and Method / Larry W. Fullerton, Ivan A. Cowie. Приоритет 20.09.94.
27. Пат. 5687169 США. Full Duplex Ultrawide-Band Communication System and Method / Larry W. Fullerton. Приоритет 27.04.95.
28. Скородумов А.И. Современное состояние и перспективы развития подвижной связи // Доклад на семинаре «Современное состояние и перспективы развития подвижной связи», 4 декабря 2003 года // www.sotovik.ru
29. Слюсар В.И. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: НТБ. 2005. № 8. С. 52-58.
30. Столман В. Беспроводные линии связи и сети. Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.
31. Чернов Б. Что DECT грядущий нам готовит? // Электроника: НТБ. 2000. № 1. С. 8-14.
32. Черток Б.Е. Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. М.: Машиностроение, 2002.
33. Шалювич И. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2004.
34. Шалювич И. Грядет тотальная МОБИЛизация // Электроника: НТБ. 2001. № 2. С. 32-38.
35. Шалювич И. Сотовый телефон третьего поколения // Там же. № 3. С. 20-23.
36. Шалювич И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение // Там же. № 4. С. 8-15.
37. Шалювич И. Цифровое радиовещание — последний патрик цифрового портрета? // Там же. 2002. № 3. С. 8-15.
38. Шалювич И. Беспроводные локальные сети. Анатомия стандартов IEEE 802.11 // Там же. 2003. № 1. С. 38-48.

39. Шапчиц И. Беспроводные локальные сети IEEE 802.11 — G дали! // Там же. № 4. С. 36–39.
40. Шапчиц И. Сети городского масштаба: решения рабочей группы IEEE 802.16 — в жизнь! // Там же. № 8. С. 50–56.
41. Шапчиц И. Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15.3 и 802.15.4 // Там же. 2004. № 6. С. 32–36.
42. Шапчиц И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц // Там же. 2005. № 1. С. 8–14.
43. Шапчиц И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16. Режим OFDMA и поддержка адаптивных антенных систем // Там же. № 2. С. 46–52.
44. Шапчиц И. Стандарт IEEE 802.11n — уж скоро. Примирение непримиримых. // Там же. 2006. № 2. С. 46–52.
45. AirForce-BR100-R-11.14.02 // Broadcom, 2002.
46. Alamouti, S.M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications // IEEE Journal on Select Areas in Communications, Oct. 1998. Vol. 16. № 8. P. 1451–1458.
47. Arensman R. Intel, 11g fuel WLAN boom // Electronic Business. 5/1/2003.
48. Barrett T.W. History of UltraWideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators // Progress in Electromagnetics Symposium. 2000. July 2000.
49. Bennett C.L., Ross G.F. Time-Domain Electromagnetics and Its Applications // Proceedings of the IEEE. 1978. Vol. 66. № 3.
50. DECT baseband controller PCD5091 // Data sheet, Philips Semiconductor.
51. Draft New Recommendation ITU-R BS. System for Digital Sound Broadcasting in the Broadcasting Bands Below 30 Mhz // ITU, Document 6/63-E, 25 October 2000.
52. ETS 300 401. Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers // European Telecommunications Standards Institute, 2001.
53. Fox B. Has the United States got it wrong with digital terrestrial TV? Digital TV Rollout // IEEE Spectrum Online. 2001. February.
54. Golay M.J.E. Complementary series. // IRE Trans. 1961. IT-7. P. 82–87.
55. IBC's DECT'99 World Congress.
56. IEEE Std IEEE 802.16-2004 (Revision of IEEE Std IEEE 802.16-2001). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems // IEEE. 2004. 1 October.
57. Lindheimer C., Mazur S., Mobio J., Walecz M. Third-generation TDMA // Ericsson Review. 2000. № 2.
58. Mileuski A. Periodic Sequences with Optimal Properties for Channel Estimation and Fast Start-Up Equalization // IBM Journal of Research and Development. 1983. Vol. 27, № 5, P. 426–431, September.

59. Nilson M. Third-generation radio access standards // Ericsson Review. 1999. № 3.
60. CFR47, Part 15, sections 15.3 // FCC. 2005. Sept. 19.
61. Joint Proposal: High throughput extension to the IEEE 802.11 Standard: PHY. IEEE 802.11-05/1102r4.
62. Joint Proposal: High throughput extension to the IEEE 802.11 Standard: MAC. IEEE 802.11-05/1095r5.
63. PulsON Technology. Time Modulated Ultra-Wideband for Wireless Applications. Time Domain Corporation, 2000.
64. Ross G.F. A Time Domain Criterion for the Design of Windband Radiating Elements // IEEE Trans. Antennas Propogot. 1968. Vol. 16. № 3.
65. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes // Data Communications. 1999. № 9. P. 42–68.
66. Scholtz R.A. Multiple Access with Time-Hopping Impulse Modulation (invited paper) // IEEE MILCOM'93. 1993.
67. Warren J., Sargolozos N. PRISM NITRO Introduction. Intersil. 2003.
68. Webb W. ULTRAWIDEBAND: an Electronic Free Lunch? // EDN. 2000. 21 December.
69. Wideband wireless digital communications // Ed. Andreas F. Molisch. Prentice Hall PTR. 2001.
70. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. ANSI/IEEE Std 802.11. 1999 Ed.
71. www.sotovik.ru/library/statistika.world.htm
72. www.sotovik.ru/ratings/market20010101.htm
73. www.cplire.ru/win/InformChaosLab/index.htm

МИР СВЯЗИ

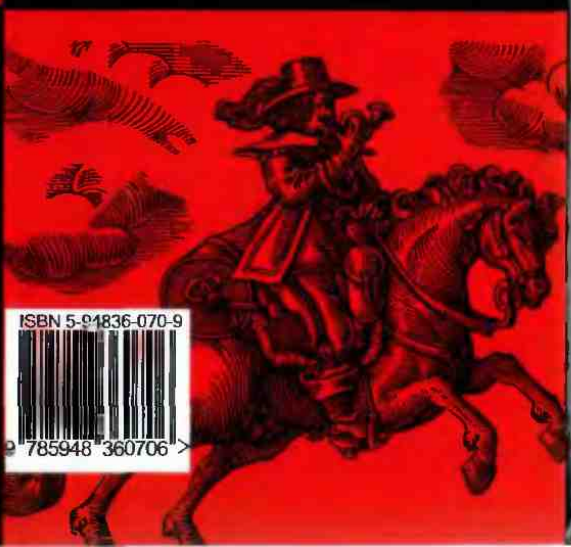
И.В. ШАХНОВИЧ
Современные
технологии
беспроводной
связи



Bluetooth И ZigBee, WiFi И WiMAX,
DECT, GSM, GPRS И EDGE, CDMA,
3G, DVB И ATSC, DAB И UWB – О
ВСЕХ ЭТИХ ТЕХНОЛОГИЯХ, И
НЕ ТОЛЬКО О НИХ, ВЫ УЗНАЕТЕ
ИЗ КНИГИ, КОТОРУЮ ДЕРЖИТЕ
В РУКАХ

...ОЧЕНЬ ПОЛЕЗНАЯ КНИГА.

ПРОФЕССОР
В.М. ВИШНЕВСКИЙ



ISBN 5-94836-070-9



9 785948 360706 >



ТЕХНОСФЕРА