

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

ГОРОДСКИЕ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.16

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к практическим занятиям*

САМАРА
Издательство СГАУ
2009

Составители: *Г.И. Леонович, Л.М. Логвинов*

Рецензент д-р техн. наук, проф. С. А. М а т ю и н

Городские сети беспроводного широкополосного доступа стандарта IEEE 802.16: метод. указания к практическим занятиям / сост. Г.И. Леонович, Л.М. Логвинов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 48 с

Методические указания представляют методическое обеспечение раздела «Системы беспроводного широкополосного доступа» программы дисциплины «Космические и наземные системы радиосвязи и сети телерадиовещания». Содержат материалы по изучению методологии и системотехнических решений, применяемых при создании сетей БШД в соответствии с технологиями WiMAX.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 210302 – Радиотехника, специализации «Телекоммуникационные системы и сети». Подготовлены на кафедре радиотехнических устройств.

Учебное издание

**ГОРОДСКИЕ СЕТИ БЕСПРОВОДНОГО
ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА
СТАНДАРТА IEEE 802.16**

Методические указания к практическим занятиям

Составители: Леонович Георгий Иванович,
Логвинов Леонид Митрофанович

Редактор Л. Я. Чегодаева
Компьютерная верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 15.02.09. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ 99 . Арт.С-57/2009.

Самарский государственный
аэрокосмический университет
443086 Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета
443086 Самара, Московское шоссе, 34

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие сведения о стандарте IEEE 802.16.....	6
2. Основные функции MAC-уровня ..	13
3. Управление соединениями.....	16
4.Режимы WirelessMAN-SC/SCa.....	18
5. Режим WirelessMAN-OFDM.....	23
6. MESH-сеть.....	30
7. Режим WirelessMAN-OFDMA.....	33
8. Поддержка адаптивных антенных систем.....	39
9. Аппаратные средства.....	42
Список литературы.....	48

Бурное развитие разнообразных мобильных телекоммуникаций и технологий эфирного межсетевого обмена продиктовало разработку стандарта, решающего проблему совместимости сетей различного масштаба. Стандарт *802.16 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)* предназначен для реализации широкополосных каналов последней мили в городских сетях (WMAN – Wireless Metropolitan Access Network). В Европе этот стандарт принят ETSI (European Telecommunications Standards Institute) под наименованием HiperMAN. Его главной задачей, наряду с высокомобильным стандартом IEEE 802.20 MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) и технологией LMDS, является обеспечение беспроводного сетевого уровня между локальными сетями типа IEEE 802.11 и региональными сетями IEEE 802.22 (WRAN – Wireless Regional Area Network). Эти технологии совместно со стандартами IEEE 802.15 (PAN – Personal Area Network - Bluetooth), 802.17 (мосты уровня MAC) и технологиями сетей мобильной связи GSM/GPRS/EDGE, CDMA-2000, DECT и UMTS образуют взаимосогласованную иерархию протоколов беспроводной связи.

Первый вариант стандарта под наименованием IEEE 802.16 «Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems» (воздушный интерфейс для фиксированных систем с широкополосным беспроводным доступом) был утвержден в январе 2001 г. и в апреле 2002 г. опубликован официально. Он описывал общие принципы построения систем широкополосного беспроводного доступа в диапазоне 10-66 ГГц. В сентябре 2001 г. вышел стандарт IEEE 802.16.2 «Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems» – сосуществование фиксированных систем широкополосного беспроводного доступа. В 2003 г. был опубликован документ IEEE 802.16e – поправки и дополнения, касающиеся работы высокомобильных абонентов в диапазоне 10-66 ГГц. Над низкочастотным диапазоном работы продолжались несколько дольше. Стандарт IEEE 802.16a «Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz» (модификации управления доступа к среде передачи и дополнительные спецификации физического уровня для диапазона 2-11 ГГц), был создан в апреле 2003 г. [1, 2].

В 2004 г. был официально утвержден новый стандарт IEEE 802.16-2004 (802.16d), заменяющий собой документы IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16e-2002 и IEEE 802.16a-2003 с достаточно серьезными изменениями в отдельных разделах. Главным образом они затронули разделы, входившие в IEEE 802.16a. Дальнейшие усовершенствования в IEEE 802.16e-2005 касаются мобильного WiMAX [2-4].

Все стандарты группы 802.16, как и 802.11, описывают два нижних уровня модели взаимодействия открытых систем OSI: физический PHY и уровень контроля доступа к среде передачи MAC (Medium Access Control). В стандартах этой группы идет речь о радиointерфейсах, методах модуляции и доступа к ка-

налам, о системе управления потоками, о структурах передаваемых данных, о механизмах связи протоколов передачи данных верхних уровней (прежде всего - АТМ и IP) с протоколами физического уровня и др. Большое значение в создании современных модификаций помехоустойчивых систем связи стандартов IEEE 802.16 придается методам адаптивной модуляции, помехозащищенного кодирования и абонентского доступа в условиях неяркой видимости и плотной городской застройки.

В настоящее время оборудование сетей WiMAX функционирует в нескольких частотных каналах в пределах диапазона 2...11 ГГц с учетом специфики большинства стран мира. Так, в Северной Америке используются участки в диапазонах 2,5 и 5 ГГц, в Центральной и Южной Америке – 2,5; 3,5 и 5 ГГц, на Ближнем Востоке, в Африке, Западной и Восточной Европе – 3,5 и 5 ГГц, в Азиатско-Тихоокеанском регионе – 2; 3; 3,5 и 5 ГГц.

В 2003 году был организован международный форум WiMAX (www.wimaxforum.org), одна из главных целей которого – тестирование на совместимость аппаратуры стандарта IEEE 802.16 различных производителей. Среди организаторов и участников этого форума: Intel, Nokia, Analog Devices, Atheros Communications, Fujitsu Microelectronics America и др. [2, 6].

Методические указания составлены таким образом, чтобы студенты получили знания об основных параметрах физического уровня сетевого взаимодействия и аппаратных средств IEEE 802.16, могли применять полученные знания на практике. Для более глубокого изучения темы целесообразно воспользоваться источниками, указанными в списке литературы.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТАНДАРТЕ IEEE 802.16

WiMAX обеспечивает объединение локальных проводных и беспроводных сетей, круглосуточный высокоскоростной доступ в Internet, цифровую голосовую связь ($n \times E1$), конвергенцию с системами сотовой связи, передачу видеотрафика, в том числе IP-TV, формирование собственных абонентских сетей. На рис. 1 показано применение WiMAX в качестве связующего звена между локальными сетями в режиме «точка-многоточка» (PMP) с ненаправленными антеннами, на рис. 2 - с использованием направленных антенн для пространственного разделения абонентов [1-3, 6,7].

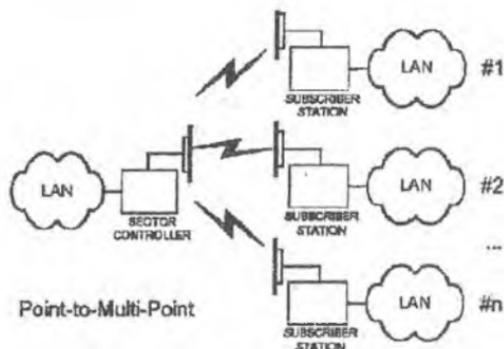


Рис. 1. Применение WiMAX для связи локальных сетей в режиме «точка-многоточка»

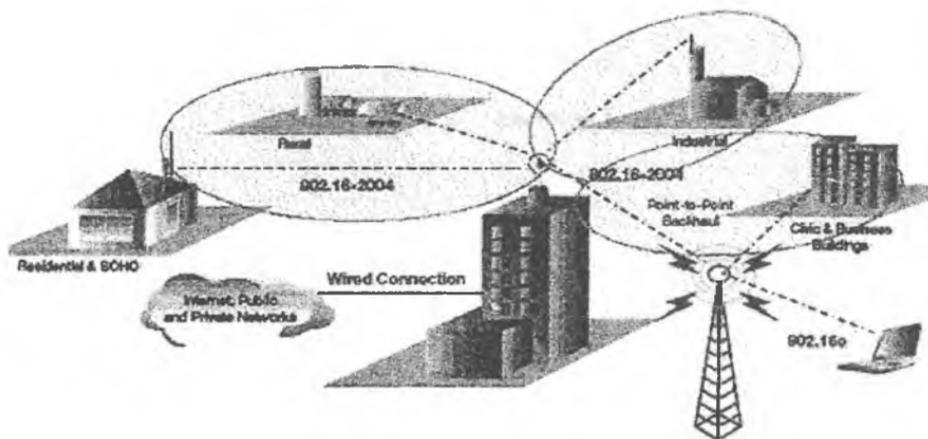


Рис.2. Применение направленных антенн в технологии IEEE 802.16

В технологиях WiMAX особое внимание уделено вариантам построения сетей с централизованным управлением по топологии PMP и адаптивным доступом для фиксированных и мобильных абонентов. Базовый стандарт IEEE

802.16, основанный на модуляции одной несущей (*Single Carrier, SC*) в диапазоне 10-66 ГГц ориентирован на фиксированных абонентов с передачей данных на скорости $r_b \approx 120$ Мбит/с в радиусе до 5 км. Типовая ширина полосы частот каналов $F_k = 25/28$ МГц. Стабильность частоты $\delta f = \pm 10^{-6}$.

Стандарт IEEE 802.16а предназначен для связи фиксированных абонентов в условиях отсутствия прямой видимости (*non Line of Sight, nLoS*). Стандарт 802.16е обеспечивает требуемое качество потребительских услуг при высокой степени мобильности абонента. Он поддерживает функции хэндовера и роуминга. Ширина полосы частот каналов 802.16а и 802.16е – регулируемая (1,5 – 20 МГц) пределах диапазона 2 ... 11 ГГц. Наиболее распространены частотные каналы шириной 7...10 МГц. Имеются сети, функционирующие в диапазоне <1ГГц (700 МГц).

Сравнительные характеристики базового стандарта и его модификаций приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики стандартов 802.16

Стандарт	802.16	802.16а	802.16е
Диапазон частот, ГГц	10-66	2-11	2-6
Ширина канала	20, 25 и 28 МГц	Регулируемая 1,5-20МГц	Регулируемая 1,5-20МГц
Условия работы	Прямая видимость	Работа на отражениях	Работа на отражениях
Скорость	32-135 Мбит/с в 28 МГц канале	до 75 Мбит/с в 20 МГц канале	до 15 Мбит/с в 5 МГц канале
Мобильность	нет	нет	да
Модуляция	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Типичный радиус покрытия	2-5 км	7-10 км, максимально до 70 км	2-5 км

Основное отличие модификаций IEEE 802.16 - 2004 и IEEE 802.16е - 2005 от вышеприведенных технологий заключается в поддержке терминального nLoS-оборудования с учетом следующих дополнительных факторов в радиоканале:

- три типа климатических зон со своими условиями затухания при распространении сигналов;
- доплеровский эффект, возникающий в среде распространения;
- флуктуация задержки при распространении сигнала в условиях движения по городу;
- фактор, связанный со статистикой фиксированных или переменных уровней сигнала;
- флуктуации коэффициента усиления антенны в условиях каналов с множественным переотражением сигнала.

Методы повышения эффективности радиоканалов: адаптивная модуляция (*Adaptive modulation*) от фазоманипулированного до *N*-QAM сигнала; примене-

ние кодирования для коррекции ошибок (Error correction); управление мощностью передатчиков (Power control).

Кроме того, используются специальные методы борьбы с интерференционными помехами:

- технология ортогональной частотной модуляции OFDM;
- подканалы (Sub-Channelisation);
- антенны с остронаправленной диаграммой (Directional antennas);
- разделение приемных и передающих антенн (Transmit and receive diversity) по технологиям MISO и MIMO.

Использование модуляции OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) позволяет значительно снизить влияние неровностей поверхности на качество принимаемого сигнала. Связь осуществляется в режиме многолучевого распространения и интерференции сигнала. Дальность действия составляет от 5 до 70 км. Скорость доступа достигает 134,4 Мбит/с для фиксированной связи и 10...20 Мбит/с для мобильной связи при скорости движения более 120 км/час.

Базовая редакция стандарта описывает пять возможных режимов организации соединений и передачи данных (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Основные режимы в стандарте WiMax

Обозначение	Диапазон, ГГц	Дуплекс	Топология	Метод передачи данных (модуляция)
WirelessMAN-SC	10-66	TDD/FDD	PtMP	Single Carrier (SC)
WirelessMAN-SCa	2-11	TDD/FDD	PtMP	SC
WirelessMAN-OFDM	2-11	TDD/FDD	PtMP, mesh	OFDM 256
WirelessMAN-OFDMA	2-11	TDD/FDD	PtMP	OFDM 2048
WirelessHUMAN (CIWA)	2-11	TDD	PtMP, mesh	SC, OFDM 256/2048

Диапазоны частот 10-66 ГГц определяют физическую среду, в которой из-за короткой длины волны связь возможна только при наличии прямой видимости. Диапазоны частот 2-11 ГГц определяют физическую среду, в которой благодаря большей длине волны прямая видимость необязательна. Кроме централизованной архитектуры «точка-многоточка» в диапазоне 2-11 ГГц предусмотрена поддержка архитектуры Mesh-сети - децентрализованной сети взаимодействующих друг с другом AS. Существенное внимание уделено качеству обслуживания (QoS), а также механизмам защиты данных соединений.

Все режимы с $f_0 < 11$ ГГц отличают три характерных детали:

- механизмы автоматического запроса повторной передачи (Automatic Repeat reQuest, ARQ);
- поддержка работы с адаптивными антенными системами (Adaptive Antenna System, AAS);
- пространственно-временное кодирование (Space Time Coding, STC) при работе с абонентскими станциями AS.

В базовом стандарте предусмотрено три режима дуплексного разделения приемопередающих каналов: бескадровый FDD (Frequency Division Duplex), кадровый FDD и TDD (Time Division Duplex) в восходящем (*uplink*, *UL*) и нисходящем (*downlink*, *DL*) каналах; протоколы множественного (многостанционного) доступа: TDMA (Time Division Multiply Access) и DAMA (Demand Assigned Multiple Access). Сети фиксированного 802.16d и мобильного 802.16e-2005 WIMAX дополнительно используют возможности OFDM и механизма работы с неполным составом поднесущих, когда разные группы абонентов используют разные подканалы со своим набором поднесущих OFDM радиосигнала. При этом различные поднесущие независимо друг от друга несут полезную информацию для разных абонентских терминалов в *UL* и *DL* каналах. Данный способ множественного доступа и мультиплексирования каналов получил название *OFDM Access (OFDMA)*. Тем самым, при *OFDMA* доступе одновременно используются протоколы временного и частотного разделения множественного доступа. Одна из ключевых технологий Mobile WiMAX – *SOFDMA (Scalable OFDMA)*. Отличие этого метода модуляции от *OFDMA* – в адаптивном изменении ширины радиоканала от 1,25 до 20 МГц с целью поддержки одновременной работы большого количества пользователей с высокой спектральной эффективностью.

При *бескадровом режиме FDD* восходящий и нисходящий каналы размещаются на разных частотах $f_u \neq f_d$, разнесенных, как правило, на 100 МГц, т.е. каждая станция может осуществлять прием и передачу одновременно (рис. 3). Оба канала не используют фиксированной длины кадров. В таком режиме нисходящий канал находится всегда во включенном состоянии, и все станции слушают его. Трафик передается широковещательно, используя мультиплексирование пакетов по времени – TDM. В восходящем канале применяется режим доступа TDMA.

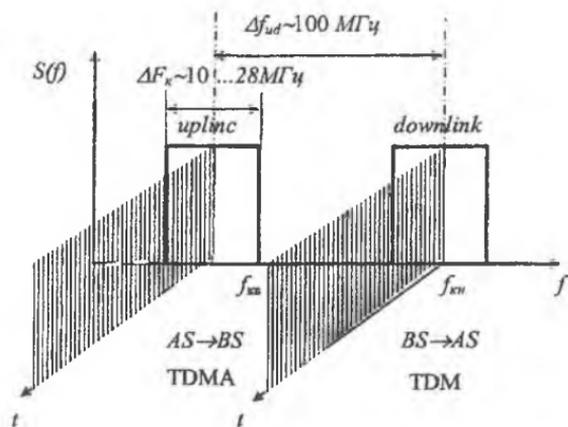


Рис. 3. Бескадровый режим FDD

В кадровом (кластерном) режиме FDD восходящий и нисходящий каналы размещаются на разных частотах, а нисходящие данные передаются в виде кластеров (bursts). Для обоих направлений обмена используются кадры фиксированной длины, позволяющие применять разные типы модуляции.

В режиме TDD, который предпочитают большинство операторов, восходящий и нисходящий каналы используют одну и ту же частоту (рис. 4). TDD-кадр имеет фиксированную длину и содержит субкадры для восходящего и нисходящего каналов. Кадр делится на целое число $n=1/4(F_c \cdot T_n)$ физических доменов (PS-slots), которые адаптивно распределяются между субкадрами (мигрирующая граница).

При модуляции OFDM на физическом уровне для сетей с архитектурой «точка-многоточка» кадровая структура передачи практически не отличается от режима SC. Так же, как и в высокочастотной области, информационный обмен происходит посредством последовательности кадров (фреймов). Длительность OFDM-кадров может составлять 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5; 20 мс.

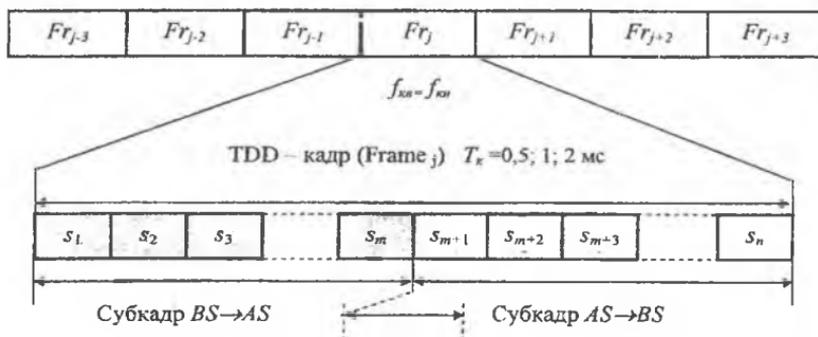


Рис. 4. Структура информационного поля TDD- кадра

Технология адаптивной модуляции (Adaptive Modulation) заключается в автоматическом выборе вида модуляции в зависимости от текущего соотношения сигнал/шум в канале передачи (рис. 5). Это позволяет использовать более спектрально-эффективные виды модуляции (например, 64-QAM) на малых расстояниях и достигать тем самым большей скорости передачи. При увеличении расстояния между станциями (или при уменьшении излучаемой мощности) возможен выбор более помехоустойчивой, но менее скоростной модуляции (например, 16-QAM или QPSK).

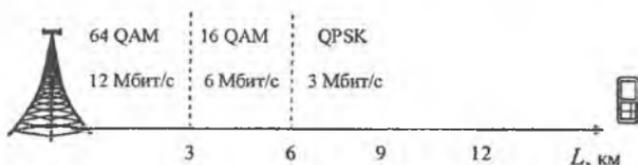


Рис. 5. Изменение метода модуляции в зависимости от расстояния (зашумленности эфира) в технологии WiMAX

Для успешной работы радиоканала нужно обеспечить достаточно большое отношение K уровней несущей C и интерференционного сигнала I с учетом теплового шума N_T и шумов приемника N_f :

$$K = \frac{C}{I + N_T + N_f}.$$

Уровень интерференционного сигнала и теплового шума порядка -138 дБВт/МГц, уровень шумов приемника - -6дБ. Эти факторы определяют выбор типа антенны, мощность передатчика, метод модуляции и предельную длину радиоканала. Необходимо учитывать, что увеличение мощности передатчика с целью улучшения отношения сигнал-шум приводит к возрастанию уровня интерференционного сигнала.

Для обеспечения низкого уровня битовых ошибок в стандарте применяются базовые и опциональные способы кодирования канала, сочетающие отличающиеся для различных режимов алгоритмы скремблирования, перемежения, блочного и сверточного кодирования.

Стандартный полнодуплексный канал базовой станции может иметь пропускную способность 75 Мбит/с. Такой канал обеспечивает до 60 соединений E1 при полосе 20 МГц с высоким QoS и минимальными задержками.

Процедура доступа и функционирования абонентской станции (AS) в сети основана на идентификации, аутентификации и шифровании трафика. AS представляет собой устройство, имеющее уникальные серийный номер, MAC-адрес и цифровую подпись X.509. Срок действительности цифровой подписи - 10 лет. После установки у клиента и подачи питания AS авторизуется на базовой станции (BS), используя определенную частоту радиосигнала, после чего BS, основываясь на вышеперечисленных идентификационных данных, передает абоненту конфигурационный файл по протоколу пересылки файлов TFTP (Trivial File Transfer Protocol). В этом файле находится информация о поддиапазоне передачи/приема данных, типе трафика, доступной полосе, расписание рассылки ключей для шифрования трафика и другая необходимая для работы AS информация. Файл с конфигурационными данными создается автоматически, после занесения администратором AS в базу абонентов, с назначением ей определенных параметров доступа.

После процедуры конфигурирования на базовой станции производится аутентификация AS:

- AS посылает запрос на авторизацию, в котором содержится сертификат X.509, описание поддерживаемых методов шифрования, другая дополнительная информация.
- BS в ответ на запрос на авторизацию (в случае достоверности запроса) присылает ответ, в котором содержится ключ на аутентификацию, зашифрованный публичным ключом абонента, 4-битный ключ для определения последовательности, необходимый для определения следующего ключа на авторизацию, а также время жизни ключа.

В процессе работы AS через промежуток времени, определяемый администратором системы, происходит повторная авторизация и аутентификация (AA). В случае успешного прохождения AA поток данных не прерывается.

Безопасность в сети обеспечивается на уровне протокола 3-DES (Data Encryption Standard) - 64-битного блочного шифратора, использующего алгоритм DES три раза с тремя различными 56-битными ключами k_i (рис. 6).

Алгоритмы шифрования C и расшифрования P описываются выражениями:

$$C = E_{k_3}(E_{k_2}^{-1}(E_{k_1}(P))); \quad P = E_{k_1}^{-1}(E_{k_2}(E_{k_3}^{-1}(C)))$$

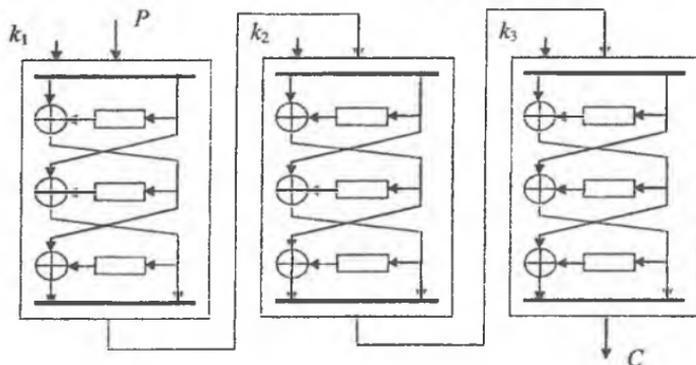


Рис. 6. Структура 3DES

Ключей для шифрования передаваемой информации несколько:

- АК – Authorization key -ключ, используемый для авторизации АК на базовой станции;
- ТЕК – Traffic Encryption Key – ключ, используемый для криптозащиты трафика;
- КЕК – Key Encryption Key – ключ, используемый для криптозащиты передаваемых в эфире ключей.

Стандарт определяет два уровня сетевого взаимодействия (рис. 7) – физический (PHY) и уровень контроля доступа (Media Access Control, MAC), функционирующих в двух плоскостях: 1) управления и передачи данных (Data/Control Plane); 2) сетевого обеспечения (Management Plane).

MAC-уровень поделен на три подуровня: Privacy Sublayer (PS) – безопасности, Convergence Sublayer (CS) – конвергенции или преобразования сервиса, Common Part Sublayer (CPS) – основной.

PHY-уровень описывает непосредственное взаимодействие в эфире по нисходящему и восходящему каналам связи. Протоколы физического уровня описывают методы организации дуплекса, способы адаптации, методы множественного доступа и модуляции. На физическом уровне стандарт предусматривает три принципиально различных метода передачи данных, основанных на применяемых видах сигнала и мультиплексирования: SC, OFDM и OFDMA. При формировании потока передаваемых данных на PHY-уровне вводятся значения для некоторых полей заголовков специальных пакетов, непосредственно связанных с технологией передачи, например, количество поднесущих для OFDM или общую ширину спектра для систем с SC.

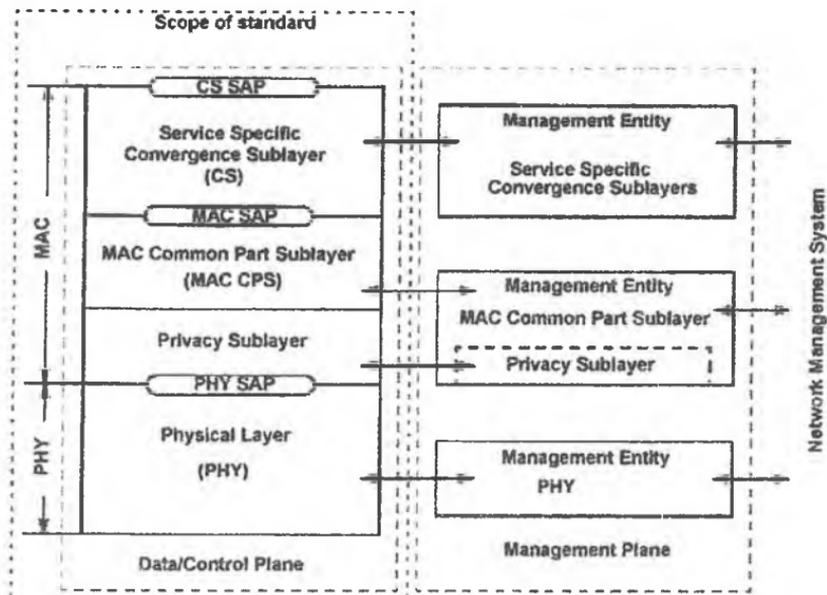


Рис. 7. Уровни и подуровни стандарта 802.16

2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ MAC-УРОВНЯ

Стандарт является единым для всех приложений и режимов протокола MAC-уровня, независимо от особенностей физического канала. Протокол MAC уровня описывает порядок взаимодействия между подуровнями, формат фрейма MAC (MAC Protocol Data Units, PDU), сервисы и механизмы опроса (поллинга), обеспечивающие поддержку качества обслуживания QoS, поддержку дуплекса (частотного или временного), синхронизацию, разрешение коллизий, возможных на этапе установления системы или на интервалах запроса на передачу. На этом уровне также обеспечивается измерение дальности до абонентских станций (AS), необходимое для корректной работы протокола, обновление описания канала, разделение абонентского оборудования на абонентские группы и др. [1, 2]

На подуровне защиты (см. рис. 7) *PS (Privacy Sublayer)* реализуются функции, обеспечивающие криптозащиту данных и механизмы аутентификации с целью предотвращения несанкционированного доступа. Для этого предусмотрены два основных компонента – набор алгоритмов криптозащиты и протокол управления ключом шифрования.

На подуровне преобразования сервиса *CS (Convergence Sublayer)* происходит трансформация потоков данных протоколов верхних уровней для передачи через сети IEEE 802.16. В одном канале могут в разные промежутки времени работать сотни различных терминалов с разными сервисами (приложениями): потоки голоса и данных с временным разделением, соединения по протоколу IP, пакетная передача речи через IP (VoIP) и т.п. При этом ка-

чество услуг (QoS) каждого отдельного сервиса не должно изменяться при работе через сети IEEE 802.16.

Сервисы, обеспечивающие QoS:

- Unsolicited Grant Service (UGS) - поддержка потоков реального времени, генерирующих пакеты данных фиксированного размера (E1, VoIP) без подавления пауз;
- Real-Time Polling Service (rtPS) - поддержка потоков реального времени, формирующих пакеты данных переменной длины (MPEG видео);
- Non-Real-Time Polling Service (nrtPS) - поддержка потоков, требующих пакетов переменной длины (широкополосная FTP);
- Best Effort (BE) service - эффективное обслуживание трафика высокой интенсивности.

Для каждого типа приложений верхних уровней CS-подуровень предусматривает свой механизм преобразования с учетом их специфики. Поэтому важная задача, решаемая на данном подуровне, – классификация пакетов и ячеек. От результатов ее решения зависит оптимизация передаваемых потоков и выделение полосы пропускания для каждого из них.

Для оптимизации транслируемых потоков предусмотрен также механизм удаления повторяющихся фрагментов заголовков PHS (Payload Header Suppression), когда заголовки пакетов и ячеек содержат повторяющуюся информацию, излишнюю при трансляции.

На основном MAC-подуровне CPS (*Common Part Sublayer*) формируются пакеты (блоки) данных MAC-уровня – MAC PDU (*MAC Protocol Data Unit, PDU*), которые передаются на физический уровень. Пакет MAC PDU включает заголовок и поле данных (при их наличии), за которым следует поле контрольной суммы CRC (рис. 8). 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.

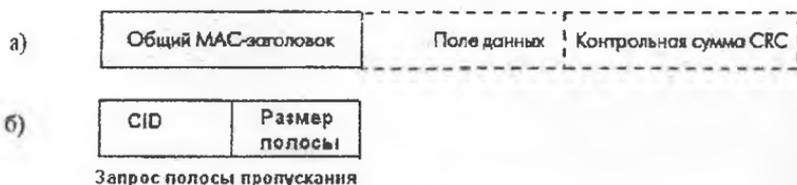


Рис. 8. Пакет MAC PDU с общим (а) заголовком и с заголовком для запроса полосы пропускания (б)

В общем заголовке указывается идентификатор соединения *CID* (*Connection ID*), тип и контрольная сумма заголовка, а также приводится информация о поле данных (табл. 3, рис. 9). Заголовок запроса полосы применяется, когда AS просит у BS выделить или увеличить ей полосу пропускания в нисходящем канале (табл. 4, рис. 10).

0	1	2	7	8	9	10	11	12	13	15
HT=0(1)	EC(1)	Тип (6)			Rsv(1)	CI(1)	EKS (2)	Rsv(1)	LEN msb(3)	
LEN lsb (8)					CID msb (8)					
CID lsb (8)					HCS(8)					

Рис. 9. Формат MAC-заголовка (бит 0 является старшим)

0	1	2	7	8	15	
HT=1(1)	EC=0(1)	Тип (6)			BR msb (8)	
BR lsb (8)				CID msb (8)		
CID lsb (8)				HCS(8)		

Рис. 10. Формат заголовка запроса полосы

Т а б л и ц а 3. Структура общего заголовка MAC PDU

Имя поля	Длина в битах	Описание поля
CI	1	Признак наличия CRC 1= CRC добавляется к полю данных 0= CRC отсутствует
CID	16	Идентификатор соединения
EC	1	Управление шифрованием (0= поле данных не зашифровано, 1= данные зашифрованы)
EKS	2	Индекс ключа шифрования трафика и вектор инициализации для шифрования поля данных. Поле информативно при EC=1
HCS	8	8-битовая контрольная сумма заголовка. Образующий полином: $g(D)=D^8+D^2+D+1$.
HT	1	Тип заголовка (признак общего заголовка = 0).
LEN	11	Длина пакета в байтах (поле данных и MAC-заголовка)
Тип	6	Тип поля данных, включающего подзаголовки

Т а б л и ц а 4. Поля заголовка запроса полосы

Имя поля	Длина в битах	Описание поля
BR	16	Запрос полосы (числа байтов запрашиваемой AS полосы восходящего канала). Запрос относится к данному CID.
CID	16	Идентификатор соединения
EC	1	Всегда =0
HCS	8	8-битовая контрольная сумма заголовка. Образующий полином: $g(D)=D^8+D^2+D+1$.
HT	1	Тип заголовка (HT = 1).
Тип	6	Поле указывает на тип заголовка запроса полосы

В заголовке указывается CID и размер требуемой полосы (в байтах, без учета заголовков физических пакетов). Поля данных после заголовков запроса полосы отсутствуют. Поле данных может содержать подзаголовки MAC, управляющие сообщения и собственно данные приложений верхних уровней, преобразованные на CS-подуровне. В стандарте описано три типа MAC-подзаголовков – упаковки, фрагментации и управления предоставлением канала. Подзаголовок упаковки используется, если в поле данных одного PDU содержатся несколько пакетов верхних уровней; подзаголовок фрагментирования – если, напротив, один пакет верхнего уровня разбит на несколько PDU. Подзаголовок управления предоставлением канала предназначен для того, чтобы AS сообщала BS изменение своих потребностей в полосе пропускания, куда входят число байт в восходящем канале для определенного соединения, сообщение о переполнении выходной очереди в AS, требование регулярного опроса со стороны BS для выяснения потребной полосы.

3. УПРАВЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЯМИ

Управляющие сообщения – это основной механизм управления системой IEEE 802.16. Из 256 зарезервированных типов управляющих сообщений используются 48: описание профилей пакетов, управление доступом, механизмы криптозащиты, динамическое изменение работы системы и т.д. Все функции управления, запроса и подтверждения реализуются через управляющие сообщения. Карты входящего/нисходящего каналов (UL-/DL-MAP) также являются управляющими сообщениями. Формат управляющих сообщений содержит поле типа сообщения (1 байт) и поле данных (параметров) [1, 2].

Доступ к каналу предоставляется исключительно базовой станцией по предварительному запросу. Начальная инициализация AS и запрос канала происходят на основе механизма конкурентного доступа в специально отведенных для этого временных интервалах. BS назначает AS время и длительность доступа к каналам в зависимости от типов данных и приоритетов. Канальный ресурс конкретной AS может изменяться посредством опроса (поллинга) со стороны BS (т.е. BS предоставляет AS окно для запроса ресурсов) или специальных управляющих сообщений со стороны AS при очередной передаче данных.

Сервисным потоком называется поток данных, связанный с определенным приложением. В этом контексте 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 AS базовая станция сразу понимает, с каким сервисным потоком имеет дело и какие условия передачи ему нужно обеспечить. Так, при начальной инициализации в сети каждой AS назначается три CID для служебных сообщений трех уровней. Одна AS может устанавливать множество различных соединений с различными CID, определяющих разные приложения – телефонию, телевиде-

ние, доступ в Интернет, в распределенную корпоративную сеть и т.д. Каждое из этих приложений предъявляет свои требования к QoS и скорости передачи. Посредством CID базовая станция предоставляет необходимый ресурс.

При доступе к каналу по запросу Demand Assigned Multiple Access (DAMA) ни одна AS не может ничего передавать, кроме запросов на регистрацию и предоставление канала, пока BS не разрешит ей этого – т.е. ответит временной интервал в восходящем канале и укажет его расположение в карте UL-MAP. AS может запрашивать как определенный размер полосы в канале, так и просить об изменении уже предоставленного ей канального ресурса.

Стандарт предусматривает два режима предоставления доступа – для каждого отдельного соединения (Grants per connection, GPC) и для всех соединений определенной AC (Grants per subscriber station, GPSS). Режим GPSS обязателен для всех устройств в диапазоне 10-66 ГГц. GPC обеспечивает большую гибкость, однако GPSS существенно сокращает объем служебных сообщений и требует меньшей производительности от аппаратуры.

Запросы полосы могут быть как спорадическими для BS, 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. Процедура плановых запросов полосы в восходящем канале называется опросом (polling): BS как бы опрашивает AS об их потребностях. Реально это означает, что базовая станция предоставляет конкретной AS интервал для передачи запроса о предоставлении/изменении полосы, т.е. никакой конкуренции уже нет.

Опрос может быть в «реальном времени». В этом случае интервалы для запроса предоставляются AS 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 нестабилен (например, видео-MPEG). Другой вариант опроса – вне "реального времени". В этом случае BS предоставляет AS интервал для запроса также периодически, но период этот существенно больше – например, 1 с. Характерное приложение, для которого эффективен этот механизм, – RTP-протокол.

Для приложений, у которых периодичность и размер пакетов фиксированы (например, в телефонии шина E1), предусмотрен механизм доступа к каналу без требования (Unsolicited Grant Service, UGS). В этом случае BS с заданным периодом предоставляет AS для передачи данных интервалы фиксированного размера, соответствующие скорости потока данных. Если в ходе работы AS нужно изменить условия доступа, она делает это посредством специального MAC-подзаголовка управления предоставлением канала. В этом подзаголовке есть специальный флаг "опроси меня", установив который, AS просит у BS интервал для запроса новой полосы. Существенно, что в данном подзаголовке есть специальный бит индикации переполнения выходного буфера передатчика

AS, что приводит к потере данных (slip). BS может отреагировать на появление этого сигнала, например, увеличив полосу для данной AS.

4. РЕЖИМЫ WirelessMAN-SC/SCa

Режим WirelessMAN-SC предназначен для работы в диапазоне 10-66 ГГц с архитектурой «точка-многоточка» (PtMP). Особенность режима WirelessMAN-SCa – более низкий диапазон частот (2-11 ГГц), который требует применения методов и устройств, направленных на передачу данных с требуемым качеством обслуживания вне зоны прямой видимости. Передача от абонента к базовой станции («вверх») строится на комбинации двух методов многостанционного доступа: по запросу *DAMA (Demand Assigned Multiple Access)* и *TDMA*. Канал физического уровня разделен на множество тайм-слотов, предназначенных для различного использования (регистрация, утверждение, безопасность или пользовательский трафик), которые управляются уровнем MAC в BS и могут меняться во времени для достижения оптимального функционирования [1, 2].

Канал «вверх» основан на кратковременном сеансе связи TDMA. Каждый пакет предназначен для передачи протокольного блока данных (PDU MAC) переменной длины. Канал «вниз» передается в режиме TDM с информацией для каждой AS, мультиплексированной в поток данных, который принимается всеми AS в пределах того же самого сектора.

Гибкое использование всего спектра обеспечивается двумя видами дуплекса: TDD и FDD. Оба режима используют формат кратковременного сеанса связи, в котором ведется адаптивное формирование пакетов и адаптация параметров передачи для каждой AS, включая модуляцию и кодирование.

Данные на физическом уровне передаются в виде непрерывной последовательности кадров (см. рис. 4). Каждый кадр имеет фиксированную длительность – 0,5; 1 и 2 мс, поэтому его информационная емкость зависит от символической скорости и метода модуляции. Состав кадра: преамбула (синхропоследовательность длиной 32 QPSK-символа), управляющая секция, последовательности пакетов с данными (рис. 11).

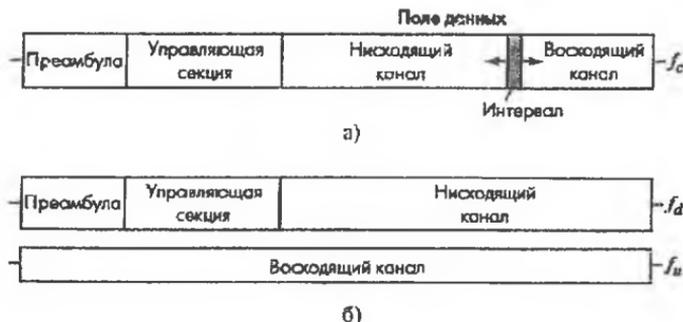


Рис. 11. Структура кадра для систем с временным (а) и частотным (б) дуплексированием каналов

При временном дуплексировании каналов кадр делится на нисходящий и восходящий субкадры, передаваемые на одной частоте f_c (рис. 11,а). Их соотношение в кадре может гибко изменяться в процессе работы в зависимости от потребной полосы пропускания для нисходящих и восходящих каналов. Субкадры разделены специальным интервалом. При частотном дуплексировании восходящий и нисходящий каналы транслируются каждый на своей несущей частоте f_u и f_d соответственно (рис. 11,б).

В нисходящем канале информация от базовой станции передается в виде последовательности пакетов по методу временного мультиплексирования TDM (рис. 12). Для каждого пакета можно адаптивно задавать метод модуляции и схему кодирования данных. Это позволяет в зависимости от параметров канала связи выбирать между скоростью и надежностью передачи. TDM-пакеты передаются вещательно для всех абонентских станций.

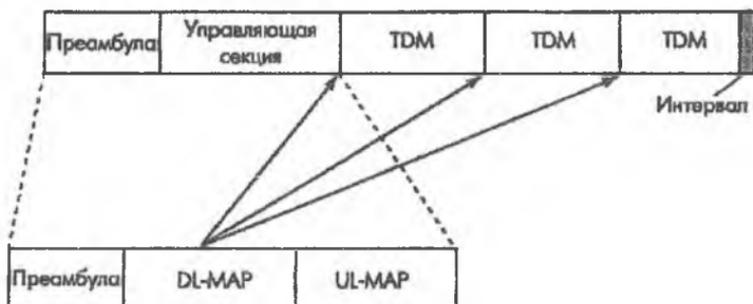


Рис. 12. Структура субкадра нисходящего канала

Каждая AS, принимая весь информационный поток, выбирает только "свои" пакеты путем декодирования заголовков пакетов и определения адреса назначения.

В нисходящем субкадре пакеты выстраиваются в очередь, начиная с самых помехозащищенных. Управляющая секция нисходящего субкадра всегда передается посредством QPSK-модуляции. Это выполняется из соображений обеспечения надежной синхронизации абонентских станций с плохими условиями приема, которым предназначаются наиболее защищенные пакеты, чтобы не произошла расстройка в ожидании своей порции информации.

Пакеты в нисходящем субкадре следуют друг за другом без интервалов и предваряющих их заголовков. Чтобы AS 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 кадра, число пакетов в нисходящем субкадре, а также точка начала и тип профиля каждого пакета. Точка начала отсчитывается в физических слотах, каждый из которых 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. Список профилей в виде специальных управляющих сообщений (дескрипторов нисходящего и восходящего каналов, DCD/UCD) транслируется базовой станцией с периодом 10 с, причем каждому профилю присваивается номер, который и используется в карте нисходящего канала.

Абонентские станции получают доступ к среде передачи по *восходящему каналу* посредством механизма временного разделения каналов TDMA (рис. 13). Для этого в восходящем субкадре для каждой передающей AS базовая станция резервирует специальные временные интервалы – слоты. Информация о распределении слотов между AS записывается в карте восходящего канала UL-MAP, транслируемой 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.



Рис. 13. Структура субкадра в восходящем канале

Сообщение UL-MAP текущего кадра может относиться как к данному кадру, так и к последующему. Скорость модуляции (частота смены символов) в восходящем канале должна быть такой же, как и в нисходящем. В отличие от нисходящих TDM-пакетов, каждый пакет в восходящем канале начинается с преамбулы – синхропоследовательности длиной 16 или 32 QPSK-символа.

В восходящем канале кроме назначенных BS-слотов для определенных AS предусмотрены интервалы, в течение которых AS может передать сообщение для первичной регистрации в сети, для запроса канала или изменения полосы пропускания канала. Поскольку эти сообщения спонтанны, в данных интервалах возможны коллизии, вызванные одновременной работой передатчиков двух и более AS. Принцип борьбы с коллизиями аналогичен CSMA, используемому в стандарте 802.11: после того как AS решила, что ей нужно зарегистрироваться/запросить канал, она не начинает трансляцию в первом же предназначенном для этого интервале. В AS 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 AS отсчитывает 11 интервалов, предназначенных для регистрации/запроса канала и только в 12-м выходит в эфир. Если передача прошла успешно и BS приняла запрос, она в определенный период ответит специальным сообщением. В противном случае AS 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 BS. Максимальный размер диапазона воз-

можных значений случайных последовательностей ограничен, и при его достижении ГСЧ вновь принимает минимальное значение.

В режиме FDD стандарт допускает применение дуплексных и полудуплексных абонентских станций. Последние не способны одновременно принимать и передавать информацию. Для полудуплексных AS, которые в силу конструктивных особенностей сначала принимают информацию и лишь затем передают свои данные, в нисходящем FDD кадре предусмотрена область с механизмом TDMA в которой информация передается в определенных временных интервалах (рис. 14). Нисходящие пакеты, передаваемые в режиме TDMA, обязательно снабжают преамбулой – синхропоследовательностью длиной 16 QPSK-символов, чтобы полудуплексные абонентские станции могли при необходимости восстановить синхронность. Таким образом, фактически в FDD-режиме частично используется принцип доступа к среде передачи в режиме разделения времени.

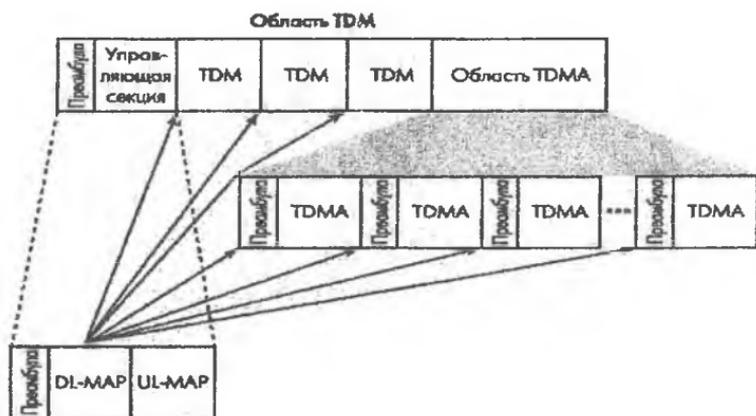


Рис. 14. Нисходящий канал в случае FDD при работе с полудуплексными абонентскими станциями

Важная особенность стандарта – система контроля радиотракта, благодаря которой базовая станция способна контролировать синхронность, несущую частоту и мощность каждой AS, а при необходимости изменять (корректировать) эти параметры посредством служебных сообщений.

Физический уровень WiMAX занимается непосредственной доставкой потоков данных между BS и абонентскими станциями. Все задачи, связанные с формированием структур этих данных, а также управлением работой системы, решаются на MAC-уровне.

Тракт обработки данных и формирования выходного сигнала для передачи через радиоканал - традиционный для современных телекоммуникационных протоколов (рис. 15) и практически одинаков для восходящих и нисходящих соединений.

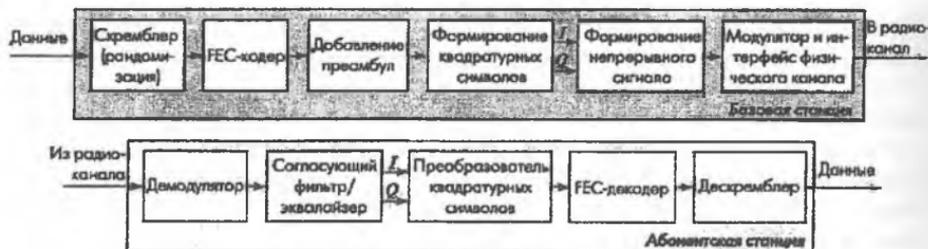


Рис. 15. Тракт формирования выходного сигнала в стандарте IEEE 802.16 (нисходящий канал BST→AS)

Входной поток данных на первом этапе скремблируется, подвергаясь рандомизации путем умножения на псевдослучайную последовательность (ПСП), формируемую 15-разрядным регистром сдвига (рис. 16).



Рис. 16. Генерация ПСП для рандомизации данных

Задающий полином ПСП

$$c(x) = x^{15} + x^{14} + 1.$$

Далее скремблированные данные защищают посредством помехоустойчивых кодов (FEC-кодирование). При этом можно использовать одну из четырех схем кодирования:

- код Рида-Соломона в базе полей Галуа GF(256);
- код Рида-Соломона с дополнительным сверточным кодом (скорость кодирования $R = 2/3$);
- код Рида-Соломона с дополнительным контролем четности ($R = 8/9$);
- блочный турбокод.

Опционально предусмотрено битовое перемежение (в режиме SCa). Гибкая схема кодирования обеспечивает различные внешние и внутренние скорости кодирования. Обобщенная схема канального кодирования показана на рис. 17. Размер кодируемого информационного блока и число избыточных байт не фиксированы – эти параметры можно задавать в зависимости от условий среды передачи и требований к качеству предоставления услуг (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 две схемы кодирования обязательны для всех устройств стандарта, остальные – дополнительные.



Рис. 17. Схема канального FEC-кодирования

В диапазоне 10-66 ГГц стандарт предусматривает схему с модуляцией одной несущей в каждом частотном канале тремя вариантами: QPSK, 16-QAM и 64-QAM. Кодированные блоки данных преобразуются в модуляционные символы. Каждой группе из 2/4/6 бит (в зависимости от типа модуляции) ставится в соответствие синфазная (I) и квадратурная (Q) координаты. Далее последовательность дискретных значений в каналах I и Q преобразуется посредством синускватратного фильтра (square-root raised cosine filter) в непрерывные сглаженные сигналы.

Фильтрованные потоки $I(t)$ и $Q(t)$ поступают непосредственно в квадратурный модулятор, который формирует выходной сигнал

$$s(t) = I(t)\cos(2f_c t) - Q(t)\sin(2f_c t),$$

где f_c - несущая частота.

Далее сигнал усиливается и передается в эфир. На приемной стороне все происходит в обратном порядке.

5. РЕЖИМ WirelessMAN-OFDM

В режиме OFDM реализуется метод ортогональной частотной модуляции потока данных в одном частотном канале шириной $\Delta f_k \geq 1-2$ МГц с центральной частотой f_c (рис. 18).

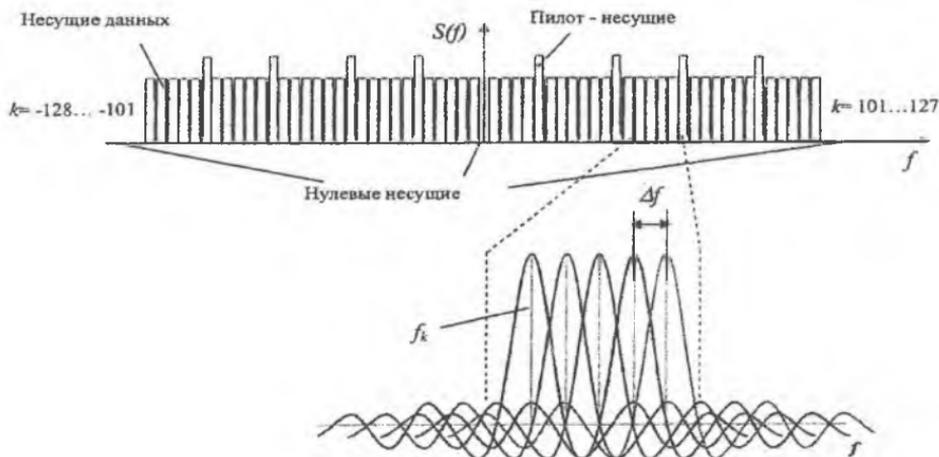


Рис. 18. Частотное разделение каналов с ортогональными сигналами

Деление на подканалы также частотное. При модуляции данных посредством ортогональных составляющих в частотном канале выделяются N необходимых для передачи данных несущих.

Частота k -й несущей

$$f_k = f_c + k\Delta f,$$

где $k \neq 0$ – целое число из диапазона $[-N/2, N/2]$; $\Delta f = 1/T_b$ – расстояние между ортогональными несущими; T_b – длительность передачи данных в символе. Помимо данных OFDM-символ включает защитный интервал длительностью T_g (рис. 19).

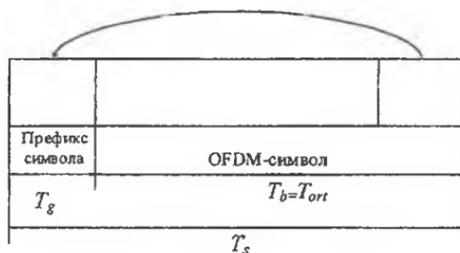


Рис. 19. Структура OFDM-символа

Общая длительность OFDM-символа с защитным интервалом равна

$$T_s = T_b + T_g.$$

Защитный интервал представляет собой копию оконечного фрагмента символа. Длительность T_g может составлять $T_b/4$, $T_b/8$, $T_b/16$ и $T_b/32$.

Каждая несущая модулируется независимо посредством квадратурной амплитудной модуляции QAM:

$$s_k(t) = I_k \cos(2\pi f_c t) - Q_k \sin(2\pi f_c t),$$

где I_k и Q_k – синфазное и квадратурное (целое и мнимое) значения комплексного символа соответственно.

Для реализации алгоритма OFDM используется обратное быстрое преобразование Фурье (*Inverse Fast Fourier Transform, IFFT*), формирующее посредством базисных тригонометрических функций из потока N цифровых символов длительностью T_s суммарный сигнал [1, 2, 7]:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} C_k e^{e^{j2\pi k \Delta f (t-T_g)}} \right\}, \quad 0 < t < T_s,$$

где C_k – комплексное представление символа квадратурной модуляции (QAM-символа).

В приемнике для восстановления данных производится прямое дискретное преобразование Фурье (*FFT*) с последующим параллельным пороговым оп-

ределением значений символов, которые переводятся в последовательность битов.

Для надежной реализации алгоритмов FFT/IFFT количество точек N выбирается из соотношения $N \leq N_{\max} = N_{FFT} = 2^n$. В режиме OFDM $N=200$ при $N_{FFT}=2^8=256$. Из N_{FFT} 55 несущих ($k = -128... -101$ и $101...127$) 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 всегда равны нулю).

Из остальных 200 несущих восемь частот – пилотные (с индексами $\pm 88, \pm 63, \pm 38, \pm 13$). Другие 192 несущие разбиты на 16 подканалов 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 опционально предусмотрена возможность работы не во всех 16, а в одном, двух, четырех или восьми подканалах. Для этого каждый подканал и каждая группа подканалов имеют свой индекс (от 0 до 31), представляя возможность для множественного доступа по технологии OFDMA (рис. 20).

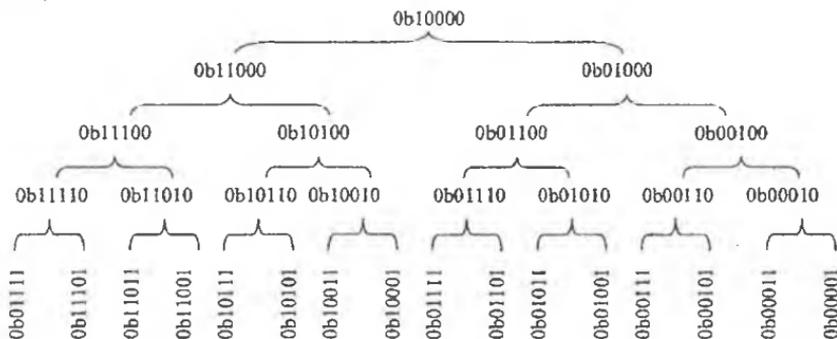


Рис. 20. Индексация подканалов и групп подканалов в режиме OFDM

Длительность полезной части T_b OFDM-символа зависит от ширины полосы канала $BW = \Delta f_k$ и системной тактовой частоты (частоты дискретизации) $F_s = N_{FFT} / T_b$. Соотношение $F_s / BW = n$ нормируется, 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).

Защитный интервал при OFDM-модуляции – средство борьбы с межсимвольными интерференционными помехами (МИС), возникающими вследствие переотражений и многолучевого распространения сигнала [1, 7]. МИС приводит к тому, что в приемнике на прямо распространяющийся сигнал накладывается переотраженный сигнал, содержащий предыдущий символ. При OFDM переотраженный сигнал попадает в защитный интервал и не причиняет искажений. Однако этот механизм не предотвращает внутрисимвольную интерфе-

ренцию – наложение сигналов с одним и тем же символом, пришедших с фазовой задержкой. В результате информация может существенно исказиться вплоть до исчезновения. Для предотвращения потери информации при пропадании отдельных символов или их фрагментов предусмотрены эффективные средства канального кодирования, включающие рандомизацию (скремблирование), помехозащитное кодирование и перемежение.

В нисходящем потоке генератор ПСП скремблера инициализируется с началом кадра посредством исходного кодового слова. Начиная со второго пакета кадра генератор ПСП инициализируется на основе идентификационного номера базовой станции BSID, идентификатора профиля пакета DIUC (downlink interval usage code) и номера кадра (рис. 21).



Рис. 21. Формирование вектора инициализации генератора ПСП для рандомизации нисходящего потока OFDM

В восходящем потоке все происходит аналогично, с той разницей, что инициализация генератора ПСП происходит с первого пакета (вместо DIUC используется UIUC - uplink interval usage code).

Кодирование данных предполагает каскадный код с двумя стадиями – кодер Рида-Соломона и сверточный кодер. Варианты каскадных кодов с применяемыми видами модуляции приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Основные режимы модуляции и кодирования в IEEE 802.16-2004

Метод модуляции	Длина блока данных до кодирования, байт	Параметры кодера Рида-Соломона	Скорость кодирования сверточного кодера, R	Суммарная скорость кодирования, R	Длина блока 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, 4	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, 8	5/6	3/4	144

В базовом виде код Рида-Соломона оперирует блоками исходных данных по 239 байт, формируя из них закодированный блок размером 255 байт (добавятся 16 проверочных байт). Такой код способен восстановить до 8 поврежденных байт. Поскольку реально используются блоки данных меньшей длины

K , перед ними добавляются $(239 - K)$ нулевых байт. После кодирования эти байты удаляются. Если необходимо сократить число проверочных слов, так чтобы уменьшить число восстанавливаемых байт T , используются только 2 T первых проверочных байтов.

После кодера Рида-Соломона данные поступают в сверточный кодер (рис. 22) с базовой скоростью кодирования $R = 1/2$. Из каждого входного бита он формирует пару кодированных бит x и y . Выводя из последовательности пар элементы x_i или y_i , можно получать различные скорости кодирования. Так, скорости $R = 2/3$ соответствует последовательность (x, y, y_2) ; $R = 3/4 - (x, y, y_2, x_3)$; $R = 5/6 - (x, y, y_2, x_3, y_4, x_5)$.

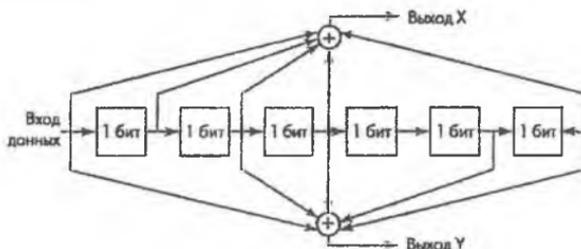


Рис. 22. Схема сверточного кодера

Кодер Рида-Соломона не используется с BPSK начальной инициализации AS или при запросе полосы. Он также пропускается, когда используется часть субканалов OFDM. В этом случае скорость сверточного кодирования принимается равной общей скорости кодирования (см. табл. 5). Соответственно, размер исходного блока данных умножается на число используемых субканалов, деленное на 16.

После кодирования следует процедура перемежения в пределах блока кодированных данных, соответствующего OFDM-символу. Эта операция проводится в две стадии. Цель первой – разнесение смежных битов по несмежным несущим. На второй стадии смежные биты разносятся в разные половины последовательности. В результате при групповых ошибках в символе повреждаются только несмежные биты, которые легко восстановить при декодировании.

Перемежение реализуется в соответствии с формулами [1, 2]

$$\begin{cases} m_k = \frac{N_{cbps}}{12} - k \bmod 12 + \text{floor}\left(\frac{k}{12}\right) \\ j_k = s - \text{floor}\left(\frac{m_k}{s}\right) + \left[m_k + N_{cbps} - \text{floor}\left(\frac{12m_k}{N_{cbps}}\right) \right] \bmod s \end{cases}, \quad k = 0 \dots N_{cbps} - 1,$$

где m_k и y_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 – половина числа бит на несущую (1 / 2 / 4 / 6 бит для BPSK / QPSK / 16-QAM / 64-QAM, соответственно, а 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 модуляция BPSK / QPSK / 16-QAM / 64-QAM. Исходя из выбранной схемы модуляции, блок представляется в виде последовательности групп бит, соответствующих модуляционным символам (по 1 / 2 / 4 / 6 бит). Пилотные несущие модулируются посредством BPSK. Значения сигналов на этих несущих определяются на основании бинарной 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. 23). Инициализирующие слова генератора ПСП для нисходящего и восходящего потоков различны.

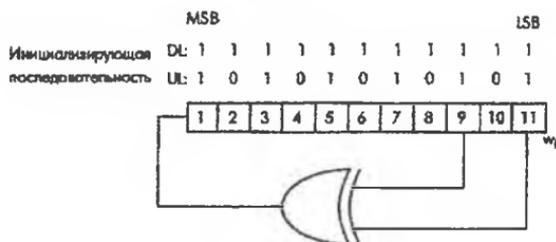


Рис. 23. Генерация модулирующей последовательности для пилотных несущих

После определения модуляционных символов посредством ОБПФ формируется радиосигнал, который передается на излучение. При приеме сигналов все процедуры производят в обратном порядке.

В режиме OFDM на физическом уровне для сетей с архитектурой "точка-многоточка" кадровая структура передачи практически не отличается от режима SC (рис. 24).

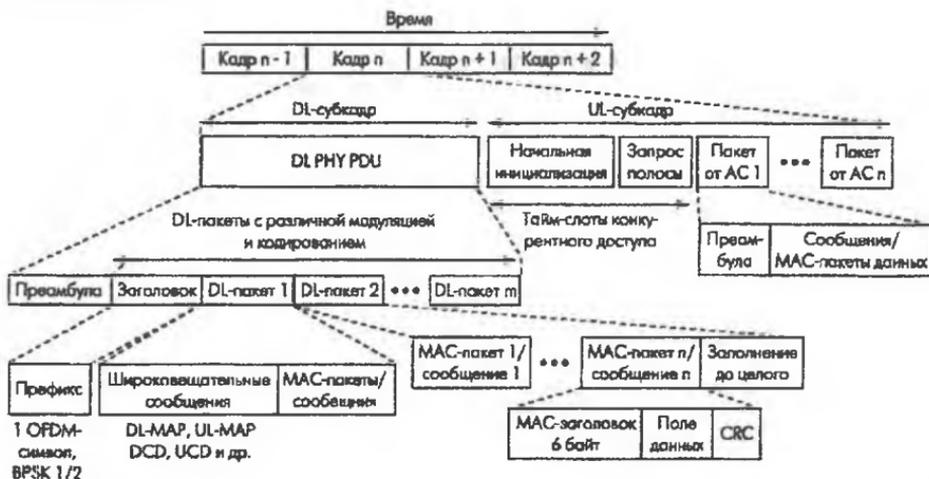


Рис. 24. Структура OFDM-кадров при TDD

Каждый фрейм делится на два субкадра: нисходящий (DL) и восходящий (UL). Разделение на восходящий и нисходящий каналы осуществляется по времени (TDD) или по частоте (FDD). В последнем случае DL и UL транслируются одновременно, в разных частотных диапазонах. Нисходящий субкадр включает преамбулу, управляющий заголовок кадра (frame control header, FCH) и последовательность пакетов данных. Преамбула в нисходящем канале – посылка из двух OFDM-символов (длинная преамбула), предназначенная для синхронизации. Первый OFDM-символ использует несущие с индексами, кратными 4, второй – только четные несущие (модуляция QPSK).

За преамбулой следует управляющий заголовок кадра – один OFDM-символ с модуляцией BPSK и стандартной схемой кодирования ($R=1/2$). Он содержит префикс кадра нисходящего канала (Downlink Frame Prefix, DLFP), который описывает профиль и длину первого (или нескольких начальных) пакета в DL-субкадре.

В первый пакет входят широковещательные сообщения (предназначенные всем AS) – 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.

Нисходящий субкадр содержит интервал конкурентного доступа, включающий периоды для начальной инициализации AS (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. AS в своем временном интервале начинает трансляцию с передачи короткой преамбулы (один OFDM-символ, использует только четные несущие). За ним следует собственно информационный пакет, сформированный на MAC-уровне.

Длительность OFDM-кадров может составлять 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5; 20 мс. Заданный базовой станцией период построения кадров не может изменяться, поскольку в этом случае потребуется ресинхронизация всех AS.

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, AS передает короткий 4-разрядный код на одном из 48 субканалов, каждый из которых включает четыре несущих. Всего предусмотрено восемь кодов. Из общей таблицы кодов и номеров подканалов AS выбирает значения случайным образом.

Получив кодовое сообщение, BS предоставляет AS интервал для передачи запроса на предоставление доступа обычным порядком. Однако в отличие от других механизмов BS в UL-MAP не указывает идентификатор запросившей ее станции, а приводит номера кода запроса, подканала, а также порядковый но-

мер интервала доступа, в течение которого был передан запрос. По этим параметрам AS определяет, что интервал для запроса полосы передачи предназначен именно ей. Выбор момента для передачи 4-разрядного кода запроса доступа происходит случайным образом, по алгоритму обращения к каналу конкурентного доступа.

В режиме OFDM каналный ресурс может предоставляться не только во временной области, но и в отдельных подканалах (группах подканалов), если BS и абонентские станции поддерживают такую возможность. Одно из наиболее важных применений такой опции – Mesh-сеть.

6. MESH-СЕТЬ

Основное отличие Mesh-сети от архитектуры PMP в том, что если в последнем случае AS может общаться только с BS, то в Mesh-сети возможно взаимодействие непосредственно между AS. Mesh-сеть является инструментом широкополосной сети, в которой трафик может передаваться по цепочке из нескольких станций. Поэтому все механизмы управления такой децентрализованной распределенной сети ориентированы на древовидную архитектуру с выделенной базовой станцией (корневой узел) и доминирующими потоками BS-AS [1, 2].

Все станции (узлы) формально равноправны. Однако практически всегда обмен трафика с внешним окружением происходит через один определенный узел (базовая станция Mesh-сети), на который возлагается часть необходимых для управления Mesh-сетью функций (рис. 25). Управление доступом происходит либо на основе механизма распределенного управления, либо централизованно, под управлением BS. Возможна комбинация обоих методов.

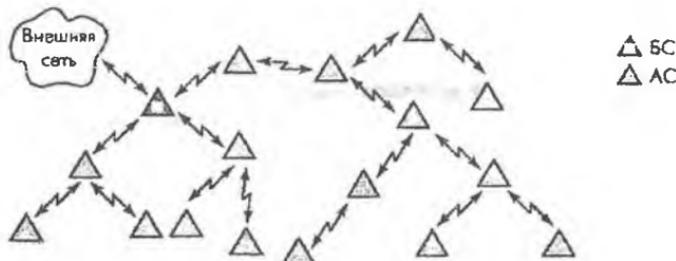


Рис. 25. Пример Mesh-сети

Соседями определенного узла называются 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 понятий восходящих и нисходящих каналов. Весь обмен происходит посредством кадров. Станции передают сообщения либо в отведенные им временные интервалы в соответствии с предшествующим назначением каналов, либо получают доступ к каналам произвольным (случайным) образом. 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.

Кадр Mesh-сети делится на управляющий субкадр и субкадр данных (рис. 26).



Рис. 26. Структура кадра Mesh-сети с вариантами управляющих субкадров

Длина управляющего субкадра – переменная величина, задаваемая BS. 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 реализуемых функций, может быть двух типов – управления сетью (network control) и управления очередностью доступа к каналам связи (schedule control). В субкадрах всегда используется модуляция QPSK с $R=1/2$. Субкадры управления включают интервалы для подключения к сети новых устройств (Network entry, NENT – "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 BS и число ее соседей, номер логического канала для передачи графика доступа

к каналам, удаленность узла (ранг соседства) от BS и т.д. Посредством таких сообщений с заданной периодичностью транслируется дескриптор сети – таблица, полностью описывающая текущие параметры сети. Среди них – длительность кадров, длина управляющего субкадра, число интервалов для сообщений децентрализованного распределения ресурсов, периодичность следования суб-пакетов 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" – интервал, в течение которого новый узел может послать сообщение NENT о своем намерении подключиться к сети (аналог интервала конкурентного доступа в сети "точка-моготочка"). Перед этим он должен принять сообщение о конфигурации сети, выбрать узел для подключения, синхронизироваться с ним и затем отправлять запрос. В ответ узел либо откажет в доступе, либо назначит новому узлу сетевой идентификатор, канал и временной интервал для проведения процедур аутентификации.

Распределение канальных ресурсов в Mesh-сети может быть централизованным и децентрализованным (распределенным). В свою очередь, децентрализованное распределение бывает координированным с BS и некоординированным.

Децентрализованное распределение ресурсов подразумевает, что распределение происходит в пределах одной группы соседей первого порядка. При координированном децентрализованном распределении узлы обмениваются между собой специальными сообщениями управления распределением (distributed scheduling, DSCH). Период выдачи таких сообщений каждой станцией определен и известен ее соседям. Координированные DSCH сообщения передаются в субкадрах управления очередностью доступа в оговоренных в сетевом дескрипторе интервалах. Некоординированные DSCH сообщения передаются в субкадре данных в виде запросов на получение канального ресурса и ответов с предоставлением (подтверждением) свободного ресурса - временного интервала в субкадре данных. Ресурс предоставляется соседом под конкретное соединение.

Централизованное распределение ресурсов подразумевает древовидную топологию сети с BS 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) BS проходит через данный узел) и сообщает свою потребность вышестоящему узлу – вплоть до BS. Проанализировав потребность, BS 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 на-

значает) расположение пакетов в субкадре данных u (для) своих соседских узлов посредством сообщений децентрализованного планирования DSCH.

Сообщения централизованного конфигурирования CSCF формируются BS 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.

7. РЕЖИМ WirelessMAN-OFDMA

Режим WirelessMAN-OFDMA (далее – OFDMA) базируется на методе множественного доступа посредством разделения ортогональных несущих. В отличие от режима OFDM описывается не только механизм модуляции, но и способ разделения каналов. Один логический OFDMA-канал образован фиксированным набором несущих, как правило, распределенных по всему доступному диапазону частот физического канала. В упрощенном виде такой механизм опционально используется в режиме OFDM путем разбиения канала на 16 подканалов [1, 2, 4].

В режиме OFDMA несущих в 8 раз больше, чем в OFDM – 2048 вместо 256. Число сетевых подканалов от 32 до 70, по 24 или 48 информационных несущих в каждом. Около 200 нижних и 200 верхних несущих составляют защитный интервал и не модулируются. Также не используется центральная частота с индексом $k=1024$. Кроме того, пилотные несущие предназначены для служебных целей, а не для передачи информации. Точное число пилотных несущих и частот в защитных интервалах незначительно варьируется в зависимости от субрежимов OFDMA. Системная тактовая частота всегда равна $F_s/BW = n = 8/7$, причем в реальных применениях $BW \geq 5$ МГц.

Распределение числа несущих по подканалам и числа 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 BS, 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 одному субканалу присваиваются несущие, равномерно распределенные по всему доступному физическому каналу. Используется и другой подход: применение в подканалах набора последовательных соседних частот. Он реализован в методе AMC (Advanced modulation and coding), предназначенном для работы с адаптивными антенными системами.

В методе AMC из 2048 несущих 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

ших в каждой. Центральная (пятая) частота в каждой группе – пилотная. Четыре соседних (по частоте) группы образуют полосу (band). Шесть групп в одной полосе образуют АМС-подканал. Понятие подканала в данном случае частотно-временное, т.е. подканал – это несколько (например, два) OFDMA-символов и три несущие. Структура АМС-подканалов в восходящем и нисходящем субкадрах одинакова.

Метод формирования, структура OFDM-символов и механизм канального кодирования в OFDMA схожи с описанными для OFDM. Канальное кодирование включает рандомизацию, помехоустойчивое кодирование, перемежение и модуляцию. Метод рандомизации практически идентичен OFDM, различны лишь способы формирования инициализирующего вектора генератора псевдослучайной последовательности (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 блоковых и сверточных турбокодов. Метод перемежения также практически идентичен с OFDM [1]:

$$\begin{cases} m_k = \frac{N_{cbps}}{16} - k \bmod 16 + \text{floor}\left(\frac{k}{16}\right) \\ j_k = s - \text{floor}\left(\frac{m_k}{s}\right) + \left[m_k + N_{cbps} - \text{floor}\left(\frac{16m_k}{N_{cbps}}\right) \right] \bmod s \end{cases}, \quad k = 0 \dots N_{cbps} - 1,$$

где m_k и y_k – номер исходного k -го бита после первой и второй стадии перемежения соответственно; N_{cbps} – число кодированных бит в OFDMA-символе; s – половина числа бит на несущую (1 / 2 / 4 / 6 бит для BPSK / QPSK / 16-QAM / 64-QAM соответственно, а для QPSK $s = 2$). Функция $\text{floor}(x)$ – наибольшее целое число, не превосходящее x ; функция $(x \bmod r)$ – остаток от x / r .

Схемы модуляции несущих полностью совпадают с OFDM, с той лишь разницей, что предусмотренный набор включает только квадратурные амплитудные модуляции QPSK и 16-QAM со скоростями кодирования $R=1/2$ и $3/4$, а также опционально 64-QAM с $R=1/2$, $2/3$ и $3/4$. Однако в OFDMA после формирования символов квадратурной модуляции и нормировки их амплитуд последовательность символов на каждой несущей умножается на биарную ПСП $\{w_k\}$, задающий полином генератора которой – $x^{11} + x^9 + 1$ (см. рис. 23). Каждая k -я несущая умножается на значение $1 - 2w_k$. 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 $c_k = 1 - 2w_k$. Однако, поскольку мощность сигналов пилотных несущих в нисходящем канале (опционально и в восходящем) должна быть на 2,5 дБ выше средней мощности информационных несущих, то значение c_k дополнительно умножается на 4/3.

Структура кадров из OFDMA-символов (рис. 27) схожа с рассмотренными ранее режимами в том, что сохраняется частотное и временное подразделение на восходящий и нисходящий субкадры.

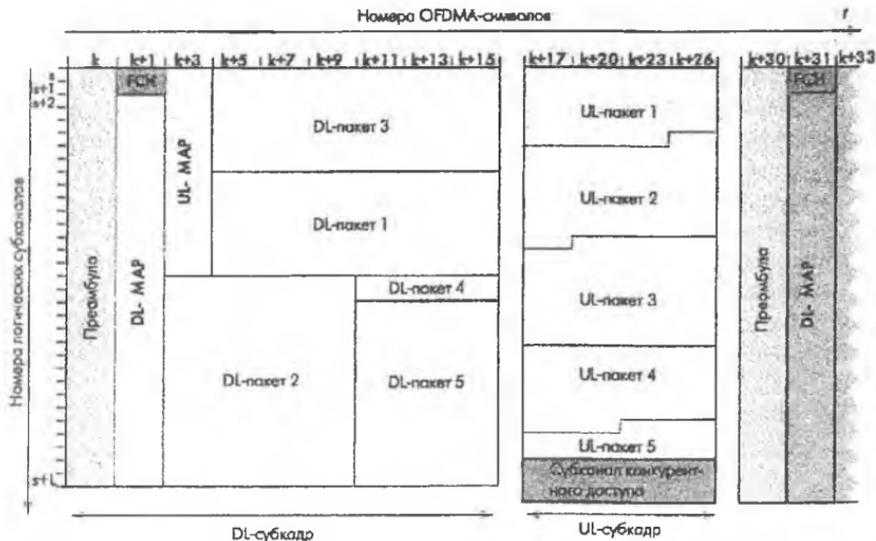


Рис. 27. Структура OFDMA-кадра

Длительность кадра может составлять 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 и 20 мс. Каждый OFDMA-символ включает набор подканалов. Пакеты данных могут передаваться одновременно, на различных OFDMA-подканалах. 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 или два символа в режимах FUSC и PUSC соответственно; в восходящем субкадре длительность слота всегда равна трем OFDMA-символам.

В пределах одного субкадра возможно использование различных механизмов распределения несущих по подканалам – FUSC, PUSC, AMC и др. Границы соответствующих зон, именуемых зонами перестановки (permutation zone) определены в картах субкадров (рис. 28).

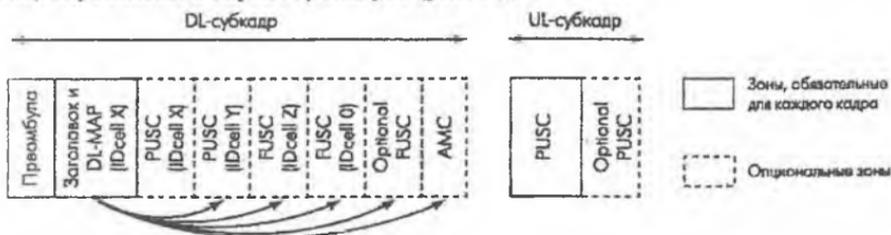


Рис. 28. Совмещение различных зон перестановки в OFDMA-кадре

В нисходящем OFDMA канале (см. рис. 27) первый символ – это преамбула. Несущие в символах преамбул модулируются посредством BPSK псевдо-

случайным кодом, зависящим от используемого сегмента (в режиме PUSC) и переменной IDcell, задаваемой на MAC-уровне. В преамбуле модулируется каждая третья несущая всего канала (кроме несущих защитных интервалов и центральной), причем начальный сдвиг [0...2] задается дополнительно. Распознав тип преамбулы, AS сразу определяет значение переменной IDcell и режим работы BS.

За преамбулой следуют два символа, передающие заголовок кадра FCH и карту распределения полей 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 DL-MAP (длина, используемый метод кодирования и число повторений), транслируемой сразу за заголовком кадра. Также в заголовке используется флаг, установка которого означает изменение в расположении области конкурентного доступа в восходящем субкадре по отношению к предыдущему кадру. Далее транслируется карта восходящего канала UL-MAP и нисходящие пакеты данных для разных AS.

Режим FUSC означает, что используется весь диапазон физического канала - все возможные несущие. Это 1702 несущие информационные частоты и защитный интервал (173 и 172 несущих в начале в конце диапазона соответственно). Центральная частота с индексом $k = 1024$ не используется.

В режиме FUSC прежде всего назначаются 166 пилотных частот. Из них 24 – фиксированные, остальные переменные. Термин «переменные» 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). Фиксированные и переменные пилотные частоты разбиты на два набора, одинаковых по объему. Это разбиение используется только при работе с адаптивными антенными системами в режиме пространственно-временного кодирования (STC). После определения пилотных частот оставшиеся 1536 несущих предназначены для передачи данных.

В режиме PUSC весь диапазон подразделяется на 60 подканалов. Для работы используется не менее 12. Подканалы группируются в шесть сегментов, из них три базовых (сегменты 0, 1 и 2), каждый включает 12 подканалов (0-11, 20-31 и 40-51 подканалы, соответственно). Деление на сегменты введено, чтобы BS было проще сообщать, в каких подканалах она работает (достаточно сообщить номера сегментов). Из 2048 частот кадра PUSC центральная ($k=1024$) и защитные (184 нижних и 183 верхних) не используются. Оставшиеся 1680 несущих последовательно разбивают на 120 кластеров по 14 несущих.

После этого последовательные физические кластеры перенумеровываются в «логические» с целью распределения 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. 29).



Рис. 29. Структура кластера

Таким образом, набору подканалов в пределах сегмента или нескольких сегментов оказывается поставленным в соответствие набор несущих (для 12 подканалов – 336 несущих, из них 24 пилотные и 288 информационных). Информационные несущие в сегменте нумеруются подряд, не учитывая пилотные частоты, после чего каждому подканалу назначаются по 24 несущих.

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 субкадре (слот) – 3 OFDMA-символ в одном подканале.

Фрагмент (мозаичный элемент, tile) представляет собой совокупность трех символов и четырех несущих, в которой положения пилотных частот жестко определены (рис. 30). Весь частотный диапазон канала (1680 несущих) разбивается на 420 последовательных фрагментов, по 4 несущих в каждом. Предусмотрено 70 подканалов. Каждый из них включает 6 фрагментов, т.е. 24 несущие на символ в одном подканале. Все 420 фрагментов разбиваются на 6 групп по 70 фрагментов. В каждый подканал включается по одному фрагменту из каждой группы. В результате каждому подканалу в каждом символе назначается свой набор несущих.

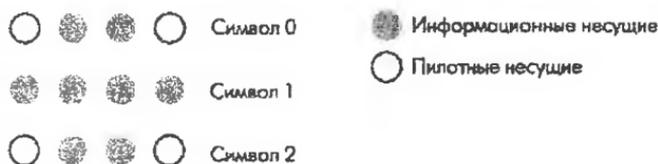


Рис. 30. Структура фрагмента восходящего канала

После распределения по подканалам происходит нумерация информационных несущих в каждом слоте, число которых в трех символах равно 48. Информационные частоты в подканале нумеруются, начиная с наименьшей несущей фрагмента с наименьшим индексом: сначала в первом символе, затем во втором и третьем. Далее информационные несущие в каждом слоте перенумеровываются путем циклического сдвига нумерации информационных несущих в каждом подканале.

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 BS 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 одном символе. В результате для передачи такого кода достаточно 6 подканалов (24 информационных несущих в каждом). Сам код формируется в генераторе ПСП – 15-разрядном сдвиговом регистре с задающим полиномом $1 + x^1 + x^4 + x^7 + x^{15}$. Старшие 6 разрядов вектора инициализации генератора ПСП равны переменной *ULJDCell*, остальные 9 – константа. Номер кода определяется начальной точкой (т.е. числом тактов генератора ПСП после инициализации) – всего предусмотрено 256 кодов. BS использует только часть из всех возможных кодов – сначала *N* кодов начальной инициализации, за ними следуют *M* кодов периодического определения параметров AS, далее *L* кодов запроса полосы. Для каждой BS задается точка начала этой последовательности ($N + M + L$).

Начальная инициализация происходит так: AS, приняв дескриптор восходящего канала и UL-MAP, определяет набор CDMA-кодов и посылает в отведенном интервале случайно выбранный код из группы возможных. Один и тот же код транслируется в двух последовательных OFDMA-символах. Если длительность интервала конкурентного доступа составляет более одного слота, AS может отправить CDMA-код в четырех последовательных символах, причем коды должны быть смежными (т.е. последовательными фрагментами ПСП).

При условии отсутствия коллизий, которые могут быть при одновременной работе передатчиков нескольких AS, базовая станция принимает и распознает CDMA-код: базовая станция должна выяснить, от какой AS пришел запрос. Поэтому в ответном UL-MAP интервале следующего кадра она указывает номер принятого CDMA-кода, субканал и символ, в котором код был отправлен. AS убеждается, что именно ее запрос принят, и понимает, что следующее за этим широковещательное сообщение с указанием диапазона запроса (номера символа, подканала и длительности) предназначено именно ей. В этом сообщении BS передает необходимые параметры для процесса инициализации в сети: идентификатор соединения CID, присвоенный MAC-адрес, набор физических параметров и др. Далее AS приступает к штатной процедуре регистрации в сети в указанный в UL-MAP интервал.

Первичный запрос полосы в методе OFDMA может происходить двумя способами: посредством заголовков запроса полосы, как в остальных режимах, или путем посылки CDMA-кода запроса полосы в интервале конкурентного доступа. Посылка кода запроса полосы вместе с запросом кода периодического измерения параметров происходит в одном OFDMA-символе. Возможна посылка трех последовательных кодов в трех символах. Какой из вариантов необходимо использовать, указывается в UL-MAP. Приняв CDMA-код, BS в интервале UL-MAP повторяет его номер и параметры, а также обычным способом сообщает интервал для отправки заголовка запроса полосы.

8. ПОДДЕРЖКА АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Важнейшая особенность стандарта – наличие встроенных средств поддержки адаптивных антенных систем (AAS) с секторными направленными антеннами. Применение AAS существенно увеличивает потенциальную емкость сети, поскольку в разных секторах BS возможна работа в одних и тех же каналах (частотных и OFDMA). Кроме того, направленные антенны позволяют существенно уменьшать общую излучаемую мощность. В результате снижается межканальная интерференция. Не менее важно применение многоэлементных антенных систем для улучшения прохождения сигналов в каналах с замираниями путем реализации методов пространственно-временного кодирования (разнесения) STC [1 - 3].

Стандарт допускает в рамках одного кадра транслировать как ненаправленный, так и направленный посредством AAS трафик (рис. 31). Принцип применения AAS практически одинаков для режимов SC, OFDM и OFDMA.

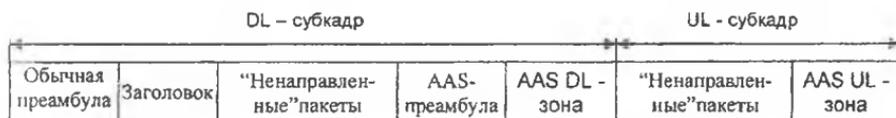


Рис. 31. Структура кадра с зоной AAS

Например, в режиме OFDMA предусмотрено два метода работы с AAS – с распределенными несущими в подканале (FUSC, PUSC) и с последовательными 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, четвертый с начала и четвертый с конца подканалы в AMC). Сообщения в этих подканалах могут повторяться несколько раз – с тем, что если используется не широкоэмитательная трансляция, а передача с переключением лучей, сообщения с префиксом дошли бы до всех AS. 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 двухкратным повтором (в пределах одного символа). Основное назначение префикса – сообщить AS о том, как будут переданы карты DL/UL-каналов для разделенных по направлениям лучей групп пользователей (очевидно, что распределение канальных 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 не менее одного широкоэмитательного кадра, содержащего дескрипторы и карты DL/UL-

каналов. Смысл объединения – обеспечение минимума управляющих сообщений для группы кадров.

Перечисленные методы работы с AAS используют механизм *Diversity-Map Scan* – сканирование абонентскими станциями разнесенных карт распределения канальных ресурсов.

В режиме OFDMA предусмотрен и другой способ работы с AAS – по методу прямой сигнализации (*Direct Signaling Method*). Этот метод использует механизм последовательного распределения несущих АМС. Его особенность заключается в том, что 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 нисходящего субкадра (для режима *Direct Signaling Method*) карты UL-MAP и DL-MAP для каждой из пространственно разделенных AS или групп AS. Благодаря точной пространственной настройке AAS данный метод позволяет в одном кадре передавать сообщения множеству пользователей. В методе прямой сигнализации предусмотрены четыре специальных кодовых сообщения: обучение обратного соединения RLT (*reverse link training*), доступ в обратном соединении RLA (*reverse link access*), обучение прямого соединения FLT (*forward link training*) и инициирование прямого соединения FU (*forward link initiation*). Первые два сообщения использует AS, вторые два – BS. Для начальной инициализации или запроса полосы AS посылает сообщение RLA в канале BWAA. Оно предшествует сообщениям запроса полосы или начального доступа и используется BS для точной настройки своей антенной системы на данную AS. В ответ BS передает сообщение FLJ – уникальный код для каждой AS. BS может сама инициировать соединение, послав FLJ. FLJ транслируется в подканале, выделенном для данной AS. Каждая абонентская станция сканирует все подканалы и, обнаружив по кодовой последовательности 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 BS на AS в данном подканале. В результате, выполнив все необходимые подстройки, BS и AS устанавливают соединение, в течение которого происходит обмен данными. Причем пакетам данных предшествуют тренировочные последовательности FLT (со стороны BS) и RLT (со стороны AS).

Еще одна важная особенность применения многоэлементных антенных систем – это возможность использовать *пространственно-временное разнесение каналов (Space-Time Coding, STC)* для улучшения прохождения радиосигналов. Идея метода – разнести в пространстве и времени источник одного и того же сигнала, т.е. изменить условия его прохождения. В результате существенно

возрастает вероятность безошибочного приема такого сигнала после соответствующей первичной обработки в приемнике.

В стандарте используется схема пространственно-временного разнесения, при которой выходной поток символов разбивается на два субпотока (например, четные и нечетные символы), обрабатываемые параллельно (рис. 32).

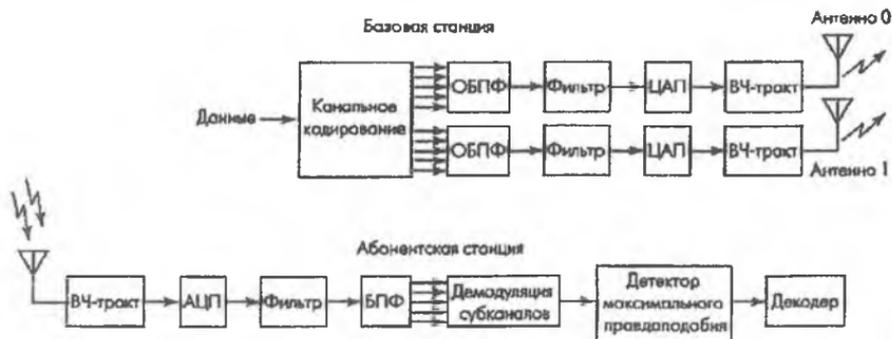


Рис. 32. Метод пространственно-временного кодирования по схеме MISO

В передаче используются два антенных канала, использующих общий тактовый генератор (что обеспечивает синхронность). Таким образом, реализуется схема MISO (Multiple Input/Single Output) – несколько входов и один выход (по отношению к каналу). Сначала антенна 0 (см. рис. 32) 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 [1]:

$$\begin{aligned} S_0 &= h_0^* r_0 + h_1 r_1^* \\ S_1 &= h_1^* r_0 + h_0 r_1^* \end{aligned}$$

Предполагается, что за время передачи двух символов передаточные характеристики не изменяются. Зона, транслируемая посредством STC, помечается в DL-MAP каждого кадра.

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, поскольку в OFDMA разделение каналов – не частотное, в дополнение к пространственно-временному разнесению используется и частотное, посредством частотных скачков (frequency hopping diversity coding–FHDC).

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. 33) добавляются антенны 0' и 1', сигнал в которых смещен по фазе (например, сигнал в антенне 0' равен $S_0' = S_0 e^{i\phi_0}$).

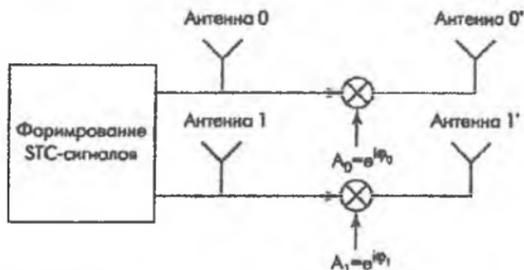


Рис. 33. Схема STC с четырьмя передающими антеннами

9. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Совершенствование технических средств для WiMAX ведется параллельно с выходом модификаций стандарта. Большинство производителей современной аппаратуры ориентировано на технологии системы на чипе (SoC). Ниже приведены примеры реализации аппаратных средств, предназначенных для применения в базовых станциях и абонентских аппаратах [1, 2, 5 - 7].

OFDM-модем на СБИС DM256 (Wavesat) реализован в корпусе PQFP-208 (рис. 34).

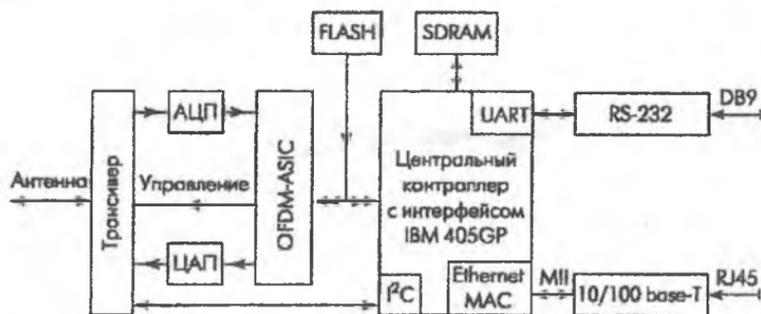


Рис. 34. Схема устройства на базе OFDM-модема DM110 компании Wavesat

DM256 оснащена ЦАП и АЦП (10 разрядов). Входной /выходной интерфейс реализованы как в виде квадратурных составляющих (I и Q), так и модулированного сигнала на промежуточной частоте 10 МГц. Поддерживается модуляция 2/4/16/64-QAM. В микросхеме реализованы механизмы временной и частотной синхронизации, поддерживается временное и частотное разделение каналов с дуплексным и полудуплексным режимами. Ширина канала – 1,75; 3; 7 и 10 МГц, длительность защитного интервала – от 1/4 до 1/32 от длительно-

сти OFDM-символа. На аппаратном уровне поддерживается кодер Рида-Соломона и декодер Витерби. Для построения оборудования на базе DM256 дополнительно необходимы ВЧ-трансммиттер и контроллер MAC-уровня. СБИС может использоваться как в BS, так и в абонентском оборудовании.

СБИС RN-2234 -модем (Runcom Technologies) с поддержкой режима OFDMA показан на рис. 35. Модем реализует схемы модуляции QPSK, 16- и 64-QAM. Поддерживаются турбокоды и кодер Рида-Соломона. 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 нисходящем канале. Выпускается по 0,18-мкм КМОП-технологии в корпусе 304 LF BGA (19x19x1,5 мм). Напряжение питания ядра/периферии – 1,8/3,3 В. Максимальная потребляемая мощность – 2 Вт.

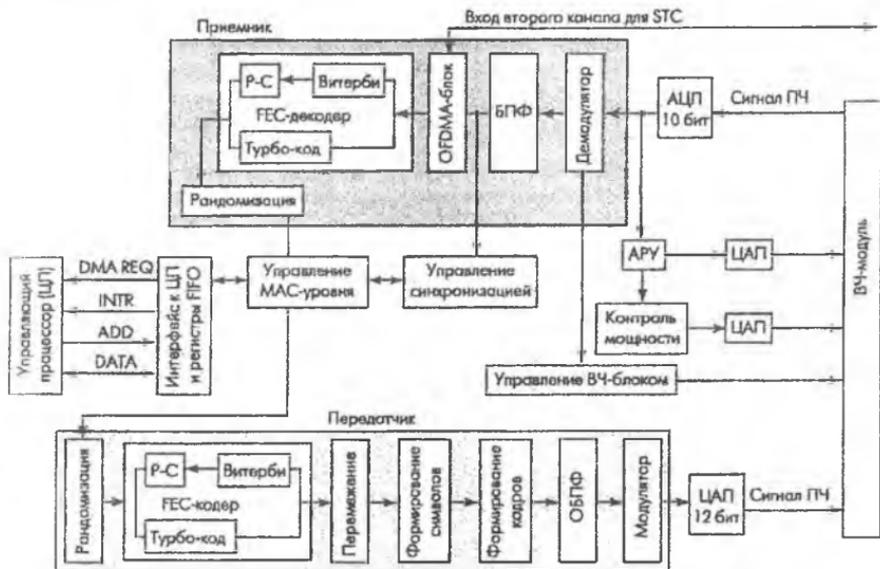


Рис. 35. Структура СБИС RN-2234 OFDMA-модема компании Runcom

Nateks-Multilink 3 – беспроводной широкополосный коммутатор операторского класса, который соответствует стандарту 802.16a и предназначен для организации каналов связи типа «точка-точка» и «точка-многоточка» как внутри, так и вне зоны прямой видимости приемопередающих антенн. Технические характеристики приведены в табл. 6. Система использует для связи технологию OFDM в частотном диапазоне 3,4—3,8 ГГц с пропускной способностью до 70 Мбит/с. Связь между абонентами осуществляется через базовую станцию. Динамический адаптивный выбор модуляции QPSK, 16 QAM и 64 QAM осуществляется на основе текущего значения отношения CINR (Carrier/Interference + Noise Ratio). Для все-

го проходящего трафика применяется метод прямой коррекции ошибок (Forward Error Correction, FEC) на основе кодов Рида-Соломона.

Т а б л и ц а 6. Технические характеристики NATEKS-MULTILINK 3

Радиочастотный диапазон	3,400 ...3,800 ГГц
Шаг настройки синтезатора частоты	250 кГц
Ширина полосы радиоканала	3,5 МГц, 7 МГц и 14 МГц
Динамический диапазон радиотракта	>50 дБ
Спектральная эффективность	5 бит/с / Гц (радио); 2,7 бит/с / Гц (сеть)
Пропускная способность радиоканала	до 70 Мбит/с (зависит от ширины полосы радиоканала)
Максимальная мощность передатчика	базовая станция +23 Бм, абонентский комплекс +15 дБм
Чувствительность приемника	88 дБм (1E-09 BER) для канала 7 МГц, QPSK ½
Дальность передачи	≥ 6,5 км вне прямой видимости ≥ 70 км при прямой видимости
Шифрование	DES (данные) и 3DES (передача ключа)
Скорость кодирования	1/2, 3/4 и 2/3
Модуляция	динамическая адаптивная модуляция (двухнаправленная) с автоматическим выбором QPSK, 16 QAM, 64 QAM и скорости кодирования

Nateks-Multilink 3 работает с двумя типами антенн: направленной (от 8° до 20°) и секторной (от 60° до 90°).

Устройство состоит из двух модулей: терминального блока, выполненного в 19" конструктиве высотой 1U и радиочастотного блока во внешнем исполнении. Терминальный и радиочастотный блоки соединены коаксиальным кабелем, по которому осуществляется передача сигнала и электропитание радиоблока.

На рис. 36 представлен внешний вид терминального блока, на переднюю панель которого вынесены все информационные и служебные интерфейсы, а также светодиодная индикация и разъемы питания.

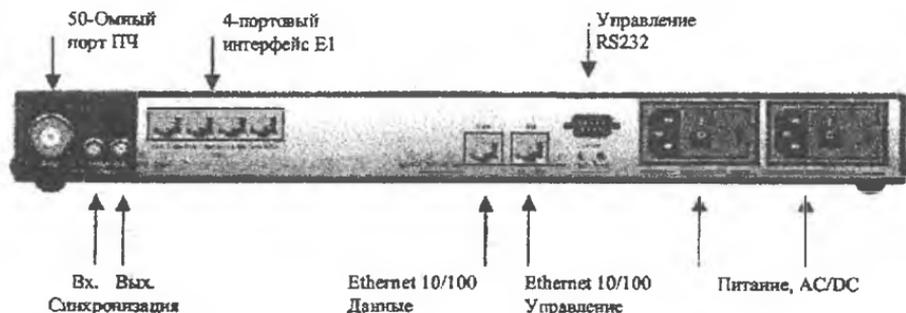


Рис. 36. Терминальный блок Nateks-Multilink 3

Терминальный блок может питаться от одного или двух источников постоянного (DC) либо переменного (AC) напряжения, либо от комбинации одного DC и одного AC источников.

Антенная секция включает порт ПЧ, два порта синхронизации и два светодиодных индикатора. Порт ПЧ представляет собой разъем N-типа и служит для связи с радиоблоком при помощи коаксиального кабеля. Через порт ПЧ осуществляются: обмен информационным потоком на ПЧ с радиоблоком; получение данных о статусе радиоблока; передача в радиоблок управляющей информации; питание радиоблока.

Секция Ethernet включает два порта (RJ-45) – порт данных и порт управления и три светодиодных индикатора состояния. Порт данных поддерживает скорости 10 Мбит/с либо 100 Мбит/с и может работать в дуплексном либо полудуплексном режимах. Порт управления служит для «внеполосного» управления и диагностики и включается либо отключается при конфигурировании системы.

Радиоблок состоит из приемопередатчика и антенны. Приемопередатчик выполнен в герметичном корпусе из алюминиевого сплава. В базовых и абонентских станциях используются разные типы приемопередатчиков.

На рис. 37 изображены приемопередатчик и антенна, смонтированные на вертикальной штанге. Из модуля приемопередатчика выходят два коаксиальных разъема – ПЧ и РЧ. Посредством порта ПЧ осуществляется обмен данными с терминальным блоком и подается питание, через порт РЧ приемопередатчик соединяется с антенной.

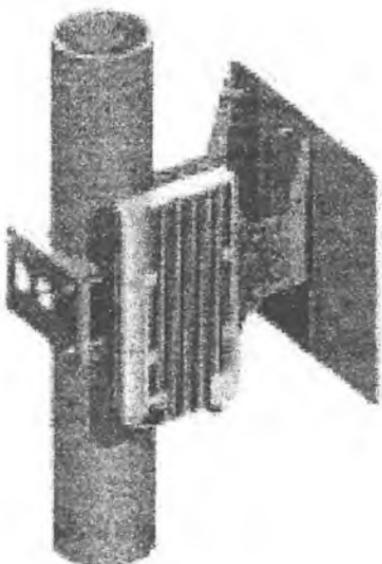


Рис. 37. Радиоблок Nateks-Multilink 3

На рис. 38 показан интегрированный модуль антенны и приемопередатчика абонентской станции, на котором расположены 50-омный разъем ПЧ, контрольный контакт RSSI для юстировки антенны и окно выравнивания давления. Размер излучающей поверхности антенны абонентской станции составляет 1' (30,48 см), ширина диаграммы 20° и усиление 18 dBi. Антенна базовой станции имеет ширину диаграммы 60° (17 dBi) либо 90° (14 dBi).

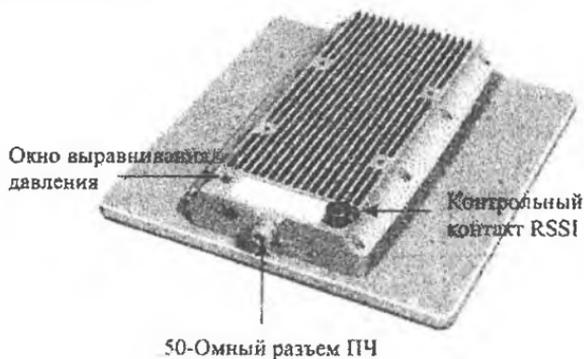


Рис. 38. Интегрированный радиоблок Nateks-Multilink 3

На рис. 39 представлен внешний вид абонентского модуля RedMAX SU-0 (Redline Communications) наружного размещения для системы беспроводного широкополосного доступа, соответствующий протоколу IEEE 802.16-2004.



Рис. 39. Абонентский модуль RedMAX SU-0

Основные свойства модуля (табл. 7): простая, быстрая и экономичная установка; возможность работы вне прямой видимости (NLOS), используя технологию OFDM; динамические параметры настройки качества обслуживания (QoS); частотный диапазон 3.4-3.6 ГГц.

Таблица 7 Технические характеристики Абонентского модуля RedMAX (SU-O)

Возможности Системы	non-LOS, ячеистая структура системы точка - много точек
ИД Диапазон	3.3-3.5; 3.4-3.6; и 3.6-3.8 ГГц
Ширина канала	3.5 МГц, 7 МГц
Спектральная эффективность	до 5 bps/Гц (по радиоканалу), до 3 bps/Гц (передача по Ethernet)
Скорость по радиоканалу	до 35 Мбит/с (при ширине канала 7 МГц)
Скорость передачи данных	до 23 Мбит/с
Кабель	максимальная длина 250м
Максимальная мощность	Тх: до +20 dBm
Rx чувствительность	<-98 dBm BPSK ½ (BER of 1x10e-6)
Сетевые атрибуты	прозрачный мост, 802.1 Q VLAN, 802.1 р, TOS/DSCP и L2/L3 приоритеты адресов трафика DHCP клиент и DHCP передача
Модуляция/Кодирование	динамическое адаптивное кодирование модуляции (двунаправленное), автоматический выбор: BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Кодирование	1/2, 3/4 и 2/3
Шифрование по радиоканалу	DES и AES
MAC	ячеистая структура системы RMP, 802.16-2004, поддерживающий структуру RMP, 802.16-2004 режим полуровня конвергенции пакета, TDMA доступ, автоматический запрос на повторение (ARQ)
Методика дуплексирования	TDD, FD-FDD (полудуплексный частотный дуплексный разнос)
Беспроводная передача (PHY)	256 FFT OFDM (мультиплексирование с ортогональным разделением частот)
Конфигурирование Системы	HTTP (Web) интерфейс, SNMP, TELNET, CLI
Сетевое управление	SNMP, стандартный и патентованный MIB, полное управление с помощью RedAccess NMS
Доступные блоки питания	автовыбор 110/220/240 VAC 50/60 Гц
Соответствие EMC	EN 301 489-1, EN 301 489-4, EN 55022/CISPR 22; RF: EN 301 021, EN 301 753; безопасность: IEC 60950-1, EN 60950-1, UL 60950-1; Industry Canada: RSS-192
Температурный диапазон	-40° C, до 65° C
Сетевой разъем	10/100 Ethernet (RJ-45)
Антенна	стандартно: интегрированная антенна 14 dBi
Габаритные размеры	20 см x 20 см x 6.35 см
Вес	2 кг

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнеvский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишнеvский [и др.]. – М.: Техносфера, 2005.
2. 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, 1 October 2004.
3. Слюсар, В. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов / В. Слюсар. – Электроника: НТБ. – 2005. – №8. – С. 52-58.
4. Телекоммуникационные системы и сети. Т. 2. Радиосвязь, радиовещание, телевидение: учеб. пособие «Горячая Линия - Телеком» / под. ред. Шувалова. – 2005.
5. Nateks-Multilink 3. Фиксированная беспроводная широкополосная система связи типа «точка-точка» и «точка-многоточка». Краткое описание. Версия 2.0 / Научно-технический центр НАТЕКС. – 2006.
6. Пакет, К. Создание сетей удаленного доступа Cisco / К. Пакет. – Cisco Press, 2003.
7. Леонович, Г.И. Космические и наземные системы радиосвязи и сети телерадиовещания/ Г.И. Леонович, Л.М. Логвинов. - Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008.