

# СЕТИ ГОРОДСКОГО МАСШТАБА: РЕШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ГРУППЫ IEEE 802.16 – В ЖИЗНЫ

**Современный мир не может без информации. Информационные магистрали сегодня не уступают по важности транспортным, они повсюду – и на суше, и на дне океана, и в космосе. Передача байта по линии связи стала не менее значимой, чем передача барреля нефти или кубометра газа. Но планете становится тесно от проводных линий связи. Эти пути уже мешают, их надо отбросить.**

**Поэтому неудивительно, что беспроводные телекоммуникационные технологии переживают сегодня подлинный бум. Пользователям требуются все большие объемы трафика и скорости передачи данных – причем срочно. Современные мультимедийные приложения этому весьма способствуют. Ведь еще десять лет назад беспроводные локальные сети казались достаточно специальным инструментом. Сегодня – это массовый продукт, а термины IEEE 802.11, Wi-Fi знают даже неспециалисты в связи.**

## ОТ WLAN К WMAN

Вал “массовизации” захлестнул и такую, как недавно казалось, специальную область, как широкополосное вещание. Такое вещание подразумевает частотные диапазоны выше 1 и даже 10 ГГц, широкие рабочие полосы частот, высокие скорости модуляции, мощные выходные усилители. Еще вчера все это ассоциировалось с огромными электронными лампами, высоким напряжением, тяжелым сложным оборудованием и т.д. Сегодня в этой области представления об аппаратуре переворачиваются. Успехи микроэлектронных технологий давно сделали высокоскоростные управляющие процессоры достаточно дешевыми и массовым продуктом. А достижения в области полупроводниковых гетероструктур и связанной с ними революции в области СВЧ-электроники все чаще и чаще отправляют электронные лампы в музей. Электроника подошла к тому уровню, где частотный диапазон свыше 10 ГГц может стать массовым, т.е. аппаратура для работы в нем становится малогабаритной, воспроизводимой и – при больших объемах выпуска – дешевой. Массовость же требует унификации. Все это обусловило то, что Международный институт электроники и электротехники (IEEE), не успев закончить работы по стандартизации в области беспроводных локальных сетей (WLAN) в диапазоне 2–5 ГГц (группа стандартов IEEE 802.11), в последний год прошлого века сформировал комитет IEEE 802.16, цель которого – создание широкополосных городских беспроводных сетей передачи данных (WMAN – Wireless Metropolitan Access Network) с фиксированным доступом. Соответственно, новый стандарт получил название WirelessMAN.

*Сеть для человека – поспешно давать обет, и после обета обдумывать.*

Книга притчей Соломоновых, глава 20, стих 25.

## КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

Собственно, история беспроводного широкополосного доступа началась гораздо раньше, чем были объективные предпосылки. Известный практик мировой революции в отдельно взятой стране выделял кино как “важнейшее из искусств”. По крайней мере в области телекоммуникаций Ильич угадал. На смену кино пришло телевидение, требующее новых и все более высокоскоростных средств доставки ТВ-трафика до зрителей. Кабельные системы со своими задачами справлялись не везде, и в 1970 году Федеральная комиссия связи (FCC) США представила, по-видимому, первую беспроводную многоточечную систему распределения MDS (Multipoint Distribution System). Она предусматривала вещание в радиусе порядка 30 миль от передатчика в диапазоне 2,1–2,7 ГГц. Эксперимент не удался – стоимость оборудования оказалась запредельной, да и конкурентов было немало (прежде всего – операторы кабельного и спутникового ТВ).

Через четверть века на смену MDS пришли новые системы MMDS (Multichannel (или Microwave) Multipoint Distribution Service) – многоканальные (микроволновые) многоточечные распределительные системы. Они позволяют работать в диапазоне 2,5–2,7 ГГц в зоне радиусом до 35 миль (50–60 км – фактически зона прямой видимости). При этом мощность передатчика базовой станции, как правило, не превышает 100 Вт (до 1 кВт) – сравните с 10–50-кВт передатчиками на ретрансляторах обычных аналоговых телевизионных сетей. В оборудовании MMDS используется квадратурная амплитудная модуляция – от четырехпозиционной QPSK (2 бита на модуляционный символ) до 256-позиционной QAM (256-QAM, 8 бит на символ). Поэтому скорости передачи данных в MMDS могут достигать очень больших значений при соответствующей ширине канала. Так, в стандартном 8-МГц телевизионном канале возможна скорость до 64 МГц – но лишь теоретически. Отметим, что концепция MMDS разрабатывалась для трансляции телевизионных программ, поэтому она принципиально однонаправленная. В последние годы стали появляться сообщения об оборудовании для двунаправленной работы – производители стали добавлять обратный канал, как правило, с гораздо меньшей (в 4–8 раз) полосой пропускания, что позволяет использовать системы MMDS и для обмена данными (доступ в Интернет, интерактивное ТВ, мосты между локальными сетями и т.д.). Однако сети MMDS так и не стали массовыми – к 2000 году в США они насчитывали около 20 тыс. абонентов [1]. Причина очевидна – оборудование слишком дорого по сравнению с альтернативными решениями (кабельное телевидение, xDSL-модемы и т.д.).

Следующим шагом в области систем широкополосного доступа стало появление концепции Local Multipoint Distribution Service (LMDS) – локальная многоточечная распределительная система. Ее испытания прошли в 1992 году в Нью-Йорке. В 1998 году FCC обя-



вила о начале лицензирования LMDS. Первой реально действующей LMDS-системой стала сотовая телевизионная сеть компании Cellular Vision в столь милом для русского сердца районе Брайтон-Бич (этот район Бруклина не был охвачен сетью кабельного телевидения).

Изначально LMDS предназначалась для работы в диапазоне 27,5–29,5 ГГц, однако рабочий диапазон зависит от распределения частот в конкретном регионе. В Европе появилась аналогичная система MVDS (Multipoint Video Distribution Systems), ориентированная на диапазон 40,5–42,5 ГГц (диапазон, выделенный в Европе для аналогового ТВ-вещания).

Системы LMDS/MVDS называют сотовым телевидением, поскольку радиус действия каждого ретранслятора невелик – порядка 3–8 км. В системах используют относительно маломощные передатчики – не более десятков ватт в групповых передатчиках (до 100–300 мВт на канал). Кроме того, в миллиметровом диапазоне затухание радиоволн весьма велико. Но, с другой стороны, волны этого диапазона отражаются от препятствий с весьма малыми потерями, что можно эффективно использовать в условиях городской застройки, работая на переотраженных сигналах.

Системы LMDS/MVDS используют те же методы модуляции (QPSK, QAM) и частотные планы (19,5–39 МГц), что и системы спутникового ТВ-вещания. Диапазон их работы определяется наличием свободного частотного ресурса и может быть, например, 10, 24, 31, 38 ГГц. При общей ширине полосы 2 ГГц эти системы позволяют передавать от 96 до 128 аналоговых ТВ-каналов. Сотовая структура сетей LMDS/MVDS открывает широкие возможности для частотного планирования, включая такие механизмы, как различная поляризация сигналов, применение направленных (секторных) антенн, использование одних и тех же каналов в разных сотах и т.д. Важно отметить, что в современных трансляционных системах твердотельные выходные усилители усиливают сигнал только в активных каналах, а не во всей полосе сразу. Именно это и обуславливает относительно невысокую мощность излучения групповых передатчиков. Для сравнения – в Нью-Йорке при внедрении системы LMDS в районе Брайтон-Бич использовались выходные усилители на основе ламп бегущей волны мощностью свыше 100 Вт, усиливающие сразу весь рабочий диапазон. Сейчас там 17 базовых станций обеспечивают 48 аналоговых ТВ-каналов (NTSC) [2].

С 2000 годы системы LMDS стали двунаправленными, что открыло перед ними широчайшие возможности для миграции из обильной конкурентами области ТВ-вещания (прежде всего – со стороны кабельного и спутникового ТВ) в зону интерактивных приложений, важнейшее из которых – Интернет (а также Video on Demand – интерактивное ТВ). И операторы соответствующих сервисов не замедлили этим воспользоваться. Однако широкому внедрению систем широкополосного доступа мешало отсутствие единого стандарта – аппаратура различных производителей оказывалась несовместимой, специализированная элементная база не могла стать массовой, соответственно, цены оставались высокими. Не стоит забывать, что названия MMDS и LMDS/MVDS фактически обозначали только тип сервиса и самые основные функциональные возможности, а не методы практической реализации. Единой технической концепции (методы модуляции, механизмы доступа к каналам и т.п.) не было. Развитие этих систем резко затормозилось, многие известные производители (например, корпорации Nortel, ADC) вообще объявили о прекращении выпуска соответствующего оборудования.

Ситуация в области широкополосного доступа складывалась не лучшим образом. Это не могло не тревожить объективного законодателя мод в области телекоммуникаций – США. Ведь Европейский институт стандартизации в телекоммуникациях (ETSI) не дремлет, хотя

и не спешит. И вот в августе 1998 года по инициативе Национальной испытательной лаборатории беспроводных электронных систем Национального института стандартов и технологии США (National Wireless Electronics Systems Testbed of the U.S. National Institute of Standards and Technology) состоялась встреча заинтересованных сторон, в результате которой комитет 802 IEEE организовал рабочую группу 802.16. С июля 1999 года группа приступила к регулярной работе. Изначально ее деятельность велась в трех направлениях: разработка стандарта для диапазона 10–66 ГГц (первоначально обозначался 802.16.1), для диапазона 2–11 ГГц (802.16.3), а также стандарта, регламентирующего совместную работу различных систем широкополосного беспроводного вещания (802.16.2).

Уже в декабре 2001 года стандарт IEEE 802.16 “Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems” (воздушный интерфейс для фиксированных систем с широкополосным беспроводным доступом) был утвержден и 8 апреля 2002 года официально опубликован. Он описывал общие принципы построения систем широкополосного беспроводного доступа и сосредотачивался на диапазоне 10–66 ГГц. Отметим, что 15 января 2003 года был опубликован документ IEEE 802.16c – поправки и дополнения к IEEE 802.16, касающиеся работы в диапазоне 10–66 ГГц. 10 сентября 2001 года увидел свет стандарт IEEE 802.16.2 “Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems” (сосуществование фиксированных систем широкополосного беспроводного доступа). Над более низкочастотным диапазоном работы продолжались чуть дольше – стандарт IEEE 802.16a “Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz” (модификации управления доступа к среде передачи и дополнительные спецификации физического уровня для диапазона 2–11 ГГц), регламентирующий работу в диапазоне 2–11 ГГц, был утвержден 29 января 2003 года, а 1 апреля опубликован.

Все стандарты группы 802.16 (равно как и их собратья 802.11) описывают два нижних уровня модели взаимодействия открытых систем (OSI) – физический и уровень контроля доступа к среде передачи (MAC – Medium Access Control)\*. В стандартах этой группы идет речь о радиоинтерфейсах, методах модуляции и доступа к каналам, о системе управления потоками, о структурах передаваемых данных, о механизмах связи протоколов передачи данных верхних уровней (прежде всего – ATM и IP) с протоколами физического уровня IEEE 802.16 и др. Что же предлагают разработчикам аппаратуры и сетей авторы новых стандартов? Идя вразрез с принятой в документах IEEE 802.16 последовательностью изложения, будем рассматривать стандарт “снизу” – с физического уровня.

### ФИЗИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ IEEE 802.16

Как уже отмечалось, стандарт IEEE 802.16 описывает работу в диапазоне 10–66 ГГц систем с архитектурой “точка-многоточка” (из центра – многим). Это – двунаправленная система, т.е. предусмотрены нисходящий (downlink, от базовой станции к абонентам) и восходящий (uplink, к базовой станции) потоки. При этом каналы подразумевают широкополосные (порядка 25 МГц), а скорости передачи – высокие (например, 120 Мбит/с).

Тракт обработки данных и формирования выходного сигнала для передачи через радиоканал в стандарте IEEE 802.16 достаточно обы-

\* На языке эталонной модели взаимодействия открытых систем MAC-уровень является нижним подуровнем уровня звена данных (канального уровня) в модели OSI. Верхним подуровнем данного уровня выступает Logical Link Control (LLC) – управление логическим соединением. Основная задача, решаемая на уровне звена данных, – сформировать двунаправленный логический канал между двумя точками и обеспечить качество услуг (уровень ошибок) независимо от качества передачи на физическом уровне [3]. Однако зачастую терминологические понятия толкуются достаточно произвольно, и в стандарте IEEE 802.16 под термином MAC, по-видимому, следует понимать уровень звена данных со всеми присущими ему задачами.

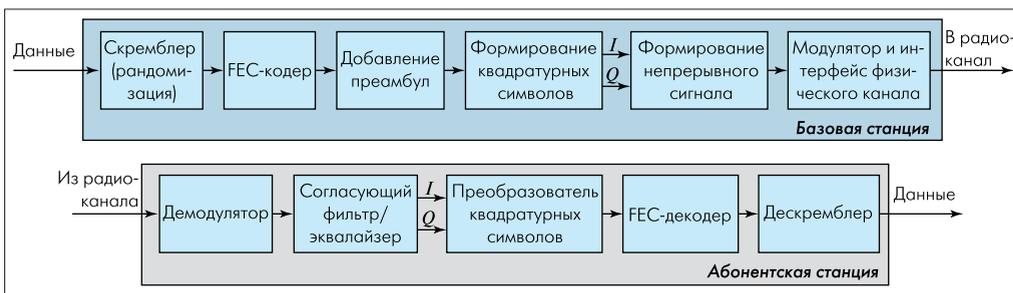


Рис.1. Тракт формирования выходного сигнала в стандарте IEEE 802.16 (нисходящий канал)

чен для современных телекоммуникационных протоколов (рис.1) и практически одинаков для восходящих и нисходящих соединений. Входной поток данных скремблируется – подвергается рандомизации, т.е умножению на псевдослучайную последовательность (ПСП), получаемую в 15-разрядном сдвиговом регистре (рис.2) (задающий полином ПСП –  $c(x) = x^{15} + x^{14} + 1$ , начальное значение –  $4A80_{16}$ ). Далее скремблированные данные защищают посредством помехоустойчивых кодов (FEC-кодирование). При этом можно использовать одну из четырех схем кодирования: код Рида-Соломона (в базе полей Галуа GF(256)), код Рида-Соломона с дополнительным сверточным кодом (скорость кодирования – 2/3), код Рида-Соломона с дополнительным контролем четности (8/9) и блочный турбокод. Размер кодируемого информационного блока и число избыточных байт не фиксированы – эти параметры можно задавать в зависимости от условий среды передачи и требований 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 два алгоритма – дополнительные.

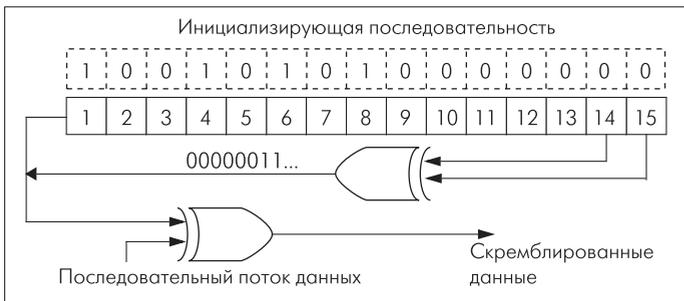


Рис.2. Генерация ПСП для рандомизации данных

В диапазоне 10–66 ГГц стандарт IEEE 802.16 предусматривает схему с модуляцией одной несущей (в каждом частотном канале). Стандарт допускает три типа квадратурной амплитудной модуляции: четырехпозиционную QPSK и 16-позиционную 16-QAM (обязательны для всех устройств), а также 64-QAM (опционально). Кодированные блоки данных преобразуются в модуляционные символы (каждые 2/4/6 бит определяют один символ QPSK/16-QAM/64-QAM) в соответствии с приведенными в стандарте таблицами – каждой группе из 2/4/6 бит ставится в соответствие синфазная (I) и квадратурная (Q) координаты. Далее последовательность дискретных значений в каналах I и Q преобразуется посредством так называемого синусквадратного фильтра (square-root raised cosine filter)\* в непрерывные

\* Передаточная функция идеального синусквадратного фильтра  $H(f)$  записывается как  $H(f) = 1$  при  $f < f_N(1 - \alpha)$ ;  $H(f) = 0$  при  $f > f_N(1 + \alpha)$ ;  $H(f) = \sqrt{0,5} \{1 + \sin[(f_N - f)/\alpha \cdot \pi/2f_N]\}$ , где  $\alpha$  – коэффициент избирательности (по стандарту IEEE 802.16  $\alpha = 0,25$ ),  $f_N$  – частота Найквиста, равная половине частоты дискретизации.

(сглаженные) сигналы. Фильтрованные потоки  $I(t)$  и  $Q(t)$  поступают непосредственно в квадратурный модулятор, где формируется выходной сигнал как функция  $S(t) = I(t)\cos(2f_c t) - Q(t)\sin(2f_c t)$ ,  $f_c$  – несущая частота. Далее сигнал усиливается и передается в эфир. На приемной стороне все происходит в обратном порядке.

Данные на физическом уровне

передаются в виде непрерывной последовательности кадров. Каждый кадр имеет фиксированную длительность – 0,5; 1 и 2 мс, поэтому его информационная емкость зависит от символьной скорости и метода модуляции. Кадр состоит из преамбулы (синхропоследовательности длиной 32 QPSK-символа), управляющей секции и последовательности пакетов с данными (рис.3). Поскольку определяемая стандартом IEEE 802.16 система двунаправленная, необходим дуплексный механизм. Он предусматривает как частотное (FDD – frequency division duplex), так и временное (TDD – time division duplex) разделение восходящего и нисходящего каналов.

При временном дуплексировании каналов кадр делится на нисходящий и восходящий субкадры (их соотношение в кадре может гибко изменяться в процессе работы, в зависимости от потребной полосы пропускания для нисходящих и восходящих каналов), разделенные специальным интервалом (рис.3а). При частотном дуплексировании восходящий и нисходящий каналы транслируются каждый на своей несущей (рис.3б).

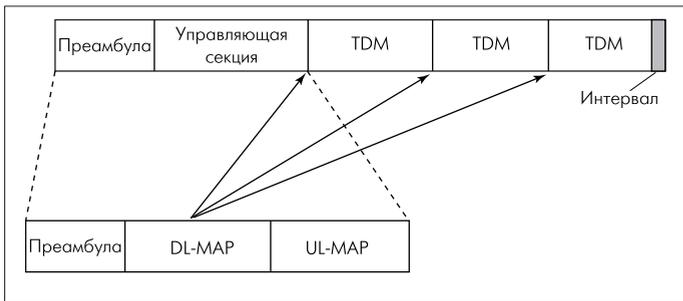
В нисходящем канале информация от базовой станции передается в виде последовательности пакетов (метод временного мультиплексирования TDM – time division multiplex) (рис.4). Для каждого пакета можно задавать метод модуляции и схему кодирования данных – т.е. выбирать между скоростью и надежностью передачи. TDM-пакеты передаются одновременно для всех абонентских станций, каждая из них принимает весь информационный поток и выбирает “свои” пакеты (декодируя заголовки пакетов и определяя адрес назначения).



Рис.3. Структура кадра в стандарте IEEE 802.16 для систем с временным (а) и частотным (б) дуплексированием каналов

В нисходящем субкадре пакеты выстраиваются в очередь так, что самые помехозащищенные передаются первыми (управляющая секция всегда передается посредством QPSK-модуляции). Если этого не сделать, абонентские станции с плохими условиями приема, которым предназначаются наиболее защищенные пакеты, могут потерять синхронизацию в ожидании своей порции информации.

Пакеты в нисходящем субкадре следуют друг за другом без интервалов и предваряющих их заголовков. Чтобы абонентские станции могли отличить один пакет от другого, в управляющей секции передаются карты нисходящего (DL-MAP) и восходящего (UL-MAP) каналов. В карте нисходящего канала указана длительность кадра, номер кадра, число пакетов в нисходящем субкадре, а также точка



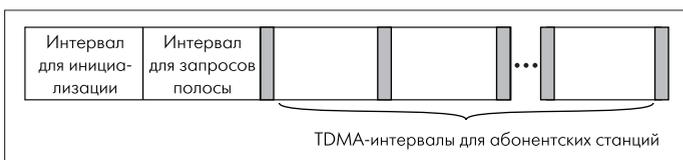
**Рис.4. Структура нисходящего канала**

начала и тип профиля каждого пакета. Точка начала отсчитывается в так называемых физических слотах, каждый физический слот равен четырем модуляционным символам.

Профиль пакета – это список его параметров, включая метод модуляции, тип FEC-кодирования (с параметрами схем кодирования), а также диапазон значения отношения сигнал/шум в приемном канале конкретной станции, при котором данный профиль может применяться. 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 посредством механизма временного разделения каналов (TDMA – time division multiple access) (рис.5). Для этого в восходящем субкадре для каждой передающей АС базовая станция резервирует специальные временные интервалы – слоты. Информация о распределении слотов между АС 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. Сообщение UL-MAP текущего кадра может относиться как к данному кадру, так и к последующему. Скорость модуляции (частота символов) в восходящем канале должна быть такой же, как и в нисходящем. Отметим, что, в отличие от нисходящих TDM-пакетов, каждый пакет в восходящем канале начинается с преамбулы – синхропоследовательности длиной 16 или 32 QPSK-символа.

В восходящем канале, кроме назначенных БС слотов для определенных АС, предусмотрены интервалы, в течение которых АС может передать сообщение для первичной регистрации в сети или для запроса канала/изменения полосы пропускания канала. Поскольку эти сообщения спонтанны, в данных интервалах возможны коллизии, вызванные одновременной работой передатчиков двух и более АС. Принцип борьбы с коллизиями аналогичен используемому в стандарте 802.11 – после того, как АС решила, что ей нужно зарегистрироваться/запросить канал, она не начинает трансляцию в первом же предназначенном для этого интервале. В АС есть генератор случайных чисел (ГСЧ), выбирающий значения из некоего диапазона от 0 до  $2^n - 1$ . Так, если  $n=4$ , ГСЧ выбирает числа в диапазоне 0–15, например 11. Далее АС отсчитывает 11 интервалов, предназначенных для регистрации/запроса канала и только в 12-м выходит в эфир. Если передача прошла успешно и БС приняла запрос, она в определенный

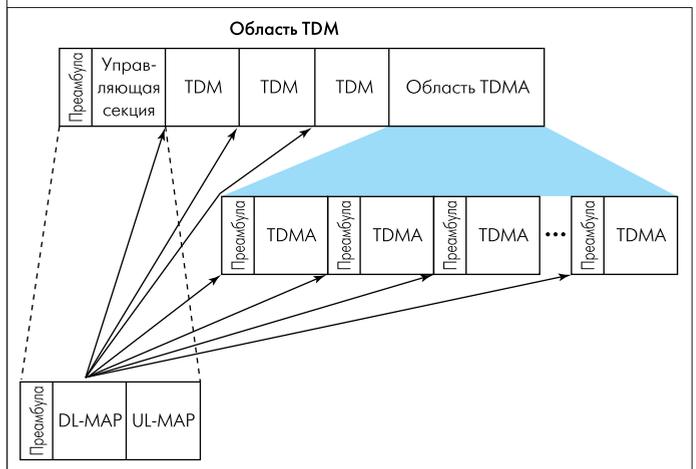


**Рис.5. Структура восходящего канала**

период ответит специальным сообщением. В противном случае АС считает попытку неудачной и повторяет процедуру, только интервал выбора для ГСЧ удваивается. Такая последовательность действий продолжается до тех пор, пока не будет получен ответ от БС. Максимальный размер диапазона возможных значений ГСЧ ограничен – при его достижении он вновь принимает минимальное значение.

Примечательно, что в режиме FDD стандарт IEEE 802.16 допускает применение как дуплексных, так и полудуплексных абонентских станций. Последние не способны одновременно принимать и передавать информацию. Для полудуплексных АС, которые в силу конструктивных особенностей сначала принимают информацию и лишь затем передают свои данные, в нисходящем FDD кадре предусмотрена область с механизмом TDMA – для таких станций информация передается в определенных временных интервалах (рис.6). Причем нисходящие пакеты, передаваемые в режиме TDMA, обязательно снабжают преамбулой – синхропоследовательностью длиной 16 QPSK-символов, чтобы полудуплексные абонентские станции могли при необходимости восстановить синхронность. То есть фактически и в FDD-режиме частично используется принцип доступа к среде передачи в режиме разделения времени.

Важная особенность стандарта IEEE 802.16 – система контроля радиотракта, благодаря которой базовая станция способна контролировать синхронность, несущую частоту и мощность каждой АС и при необходимости изменять/корректировать эти параметры посредством служебных сообщений.



**Рис.6. Нисходящий канал в случае FDD при работе с полудуплексными абонентскими станциями**

Физический уровень стандарта IEEE 802.16 занимается непосредственной доставкой потоков данных между БС и абонентскими станциями. Все же задачи, связанные с формированием структур этих данных, а также управлением работой системы IEEE 802.16, решаются на MAC-уровне.

### MAC-УРОВЕНЬ СТАНДАРТА IEEE 802.16

Оборудование стандарта IEEE 802.16 призвано формировать транспортную среду для различных приложений (сервисов), поэтому первая задача, решаемая в IEEE 802.16, – это механизм поддержки разнообразных сервисов верхнего уровня. Разработчики стандарта стремились создать единый для всех приложений протокол MAC-уровня, независимо от особенностей физического канала. Это существенно упрощает связь терминалов конечных пользователей с городской сетью передачи данных – физически среды передачи в разных фрагментах WMAN могут быть различны, но структура данных одинакова. В одном канале могут работать (не одновременно) сотни



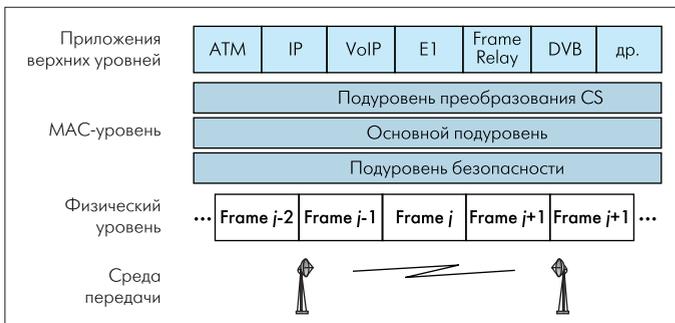
различных терминалов еще большего числа конечных пользователей. Этим пользователям необходимы самые разные сервисы (приложения) – потоки голоса и данных с временным разделением, соединения по протоколу IP, пакетная передача речи через IP (VoIP) и т.п. Более того, качество услуг (QoS) каждого отдельного сервиса не должно изменяться при работе через сети IEEE 802.16. Алгоритмы и механизмы доступа MAC-уровня должны уверенно решать все эти задачи.

Структурно MAC-уровень IEEE 802.16 подразделяется на три подуровня (рис.7) – подуровень преобразования сервиса CS (Convergence Sublayer), основной подуровень CPS (Common Part Sublayer) и подуровень защиты PS (Privacy Sublayer). На подуровне защиты реализуются функции, обеспечивающие криптозащиту данных и механизмы аутентификации/предотвращения несанкционированного доступа. Для этого предусмотрены два основных компонента – набор алгоритмов криптозащиты и протокол управления ключом шифрования. Ключ каждой АС базовая станция может передавать в процессе авторизации, используя схему работы “клиент (АС) – сервер (БС)”.

На подуровне преобразования сервиса происходит трансформация потоков данных протоколов верхних уровней для передачи через сети IEEE 802.16. Для каждого типа приложений верхних уровней стандарт предусматривает свой механизм преобразования, но на сегодня описаны и вошли в спецификацию IEEE 802.16 только два – для работы в режиме АТМ и для пакетной передачи. Под пакетной передачей подразумевают достаточно широкий набор различных протоколов, включая IP. Цель работы на CS-подуровне – оптимизация передаваемых потоков данных каждого приложения верхнего уровня, с учетом их специфики. Поэтому важнейшая задача, решаемая на данном подуровне, – классификация пакетов/ячеек. От результатов ее решения зависит и оптимизация передаваемых потоков, и выделение полосы пропускания для каждого из них.

Для оптимизации транслируемых потоков предусмотрен специальный механизм удаления повторяющихся фрагментов заголовков PHS (Payload Header Suppression). Действительно, и в АТМ, и в пакетном режиме данные передаются отдельными порциями – ячейками и пакетами, соответственно. Каждая такая порция данных состоит, в общем случае, из заголовка и поля данных – фиксированных размеров для АТМ (5 и 48 байт, соответственно) и достаточно произвольных при пакетной передаче. Во многих случаях заголовки пакетов и ячеек содержат повторяющуюся информацию, излишнюю при трансляции посредством протокола IEEE 802.16. Механизм PHS позволяет избавиться от передачи избыточной информации: на передающем конце пакеты приложений в соответствии с определенными правилами преобразуются в структуры данных MAC-уровня IEEE 802.16, на приемном – восстанавливаются.

На основном подуровне MAC формируются пакеты данных (MAC PDU – MAC Protocol Data Unit, блоки данных MAC-уровня), которые



**Рис.7. Структура MAC-уровня в стандарте IEEE 802.16**



**Рис.8. Пакет MAC-уровня IEEE 802.16**

затем передаются на физический уровень и транслируются через канал связи. Пакет MAC PDU (далее – PDU) включает заголовок и поле данных (его может и не быть), за которым может следовать контрольная сумма CRC (рис.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. В общем заголовке указывается идентификатор соединения CID, тип и контрольная сумма заголовка, а также приводится информация о поле данных (см. табл.).

Структура общего заголовка MAC PDU (от старшего к младшим битам)	
Поле	Длина, бит
тип заголовка = 0 (признак общего заголовка)	1
признак шифрования поля данных	1
тип поля данных	6
не используется	1
признак наличия CRC	1
индекс ключа шифрования	2
не используется	1
длина пакета, включая заголовок (в байтах)	11
идентификатор соединения CID	16
контрольная сумма заголовка (задающий полином $g(D) = D^8 + D^2 + D + 1$ )	8

Заголовок запроса полосы применяется, когда АС просит у БС выделить или увеличить ей полосу пропускания в нисходящем канале. При этом в заголовке указывается CID и размер требуемой полосы (в байтах, без учета заголовков физических пакетов). Поля данных после заголовков запроса полосы быть не может.

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 используются, 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, чтобы АС сообщала БС изменение своих потребностей в полосе пропускания (число байт в восходящем канале для определенного соединения, сообщение о переполнении выходной очереди в АС, требование регулярного опроса со стороны БС для выяснения потребной полосы).

Управляющие сообщения – это основной механизм управления системой IEEE 802.16. Всего зарезервировано 256 типов управляющих сообщений, из них 30 описано в стандарте IEEE 802.16. Описание профилей пакетов, управление доступом, механизмы криптозащиты, динамическое изменение работы системы и т.д. – все функции управления, запроса и подтверждения реализуются через управляющие сообщения. Рассмотренные выше карты входящего/нисходящего каналов (UL-/DL-MAP) также являются управляющими сообщениями. Формат управляющих сообщений прост – поле типа сообщения (1 байт) и поле данных (параметров).

**КАК УПРАВЛЯТЬ СОЕДИНЕНИЯМИ**

Ключевой момент в стандарте IEEE 802.16 – это понятие “сервисного потока” и связанные с ним понятия “соединение” и “идентифика-

тор соединения" (CID). Поскольку система IEEE 802.16 – лишь транспортная среда, ее инфраструктура фактически формирует коммуникационные каналы для потоков данных различных приложений верхних уровней (сервисов) – передача видеоданных, ATM-потоки, IP-потоки, передача телефонных мультимплексированных пакетов типа E1 и т.д. Каждое из таких приложений обладает своими требованиями к скорости передачи, надежности (качеству обслуживания), криптозащите и т.д. Соответственно, и данные каждого приложения следует передавать через транспортную среду с учетом этой специфики. Сервисным потоком в стандарте IEEE 802.16 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 AC базовая станция сразу понимает, с каким сервисным потоком имеет дело и какие условия передачи ему нужно обеспечить. Так, при начальной инициализации в сети каждой AC назначается три CID для служебных сообщений трех уровней. Принципиально, что одна AC может устанавливать множество различных соединений с различными CID. Характерный пример – когда связь крупного офиса с телекоммуникационным узлом организована через систему IEEE 802.16. В этом случае одна AC в офисе может поддерживать совершенно разные приложения – телефонию, телевидение, доступ в Интернет и в распределенную корпоративную сеть и т.д. Каждое из этих приложений предъявляет свои требования к QoS и скорости передачи, которые нужно удовлетворить. Посредством CID базовая станция узнает, с чем имеет дело, и предоставляет необходимый ресурс.

Не менее важным для понимания идеологии IEEE 802.16 является принцип предоставления доступа к каналу по запросу Demand Assigned Multiple Access (DAMA). Ни одна AC не может ничего передавать, кроме запросов на регистрацию и предоставление канала, пока БС не разрешит ей этого – т.е. ответит временной интервал в восходящем канале и укажет его расположение в карте UL-MAP. Абонентская станция может запрашивать как определенный размер полосы в канале, так и просить об изменении уже предоставленного ей канального ресурса.

Стандарт IEEE 802.16 предусматривает два режима предоставления доступа – для каждого отдельного соединения (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. Очевидно, что первый механизм обеспечивает большую гибкость, однако второй существенно сокращает объем служебных сообщений и требует меньшей производительности от аппаратуры.

Запросы полосы могут быть как спорадическими для БС, так и планируемыми. В первом случае запросы реализуются посредством пакетов, состоящих из заголовка запроса, передаваемых на конкурентной основе в специально выделенном для них интервале восходящего канала. Процедура плановых запросов полосы в восходящем канале называется опросом (polling) – БС как бы опрашивает AC об их потребности. Реально это означает, что базовая станция предоставляет конкретной AC интервал для передачи запроса о предоставлении/изменении полосы, т.е. никакой конкуренции уже нет.

Опрос может быть в "реальном времени" – интервалы для запроса предоставляются AC 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 дан-

ных следуют с фиксированным периодом, но их размер не стабилен (например, видео-MPEG). Другой вариант опроса – вне "реального времени". В этом случае БС предоставляет AC интервал для запроса также периодически, но период этот существенно больше – например, 1 с. Характерное приложение, для которого эффективен этот механизм, – FTP-протокол.

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

Мы очень бегло рассмотрели стандарт IEEE 802.16, однако уже из краткого обзора видно, что спецификация IEEE 802.16 предоставляет создателям аппаратуры достаточно широкие возможности, не оговаривая при этом конкретные способы реализации предусмотренных стандартом алгоритмов и механизмов. Фактически IEEE 802.16, как и положено стандарту, описывает самые общие правила игры, следуя которым, возможно производить совместимую аппаратуру. Если эта цель будет достигнута, нас ожидает небывалое оживление рынка средств беспроводного доступа, а также связанных с ним услуг. Важность нового стандарта быстро осознали ведущие мировые производители аппаратуры и элементной базы, а также провайдеры сетей широкополосного доступа. По примеру известного форума Wi-Fi, 11 апреля 2003 года был организован международный форум WIMAX ([www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)), одна из главных целей которого – тестирование на совместимость аппаратуры стандарта IEEE 802.16 различных производителей. Достаточно сказать, что среди организаторов и участников этого форума такие компании, как Intel, Nokia, Analog Devices, Atheros Communications, Fujitsu Microelectronics America и многие другие.

Следует отметить, что пока нет никакой аппаратуры стандарта IEEE 802.16, равно как и специализированной элементной базы для нее – но это лишь вопрос времени. К тому же, в более низкочастотной области – 2–10 ГГц, регламентируемой стандартом IEEE 802.16a, некоторые производители объявили о создании соответствующей элементной базы. Более того, именно в этом диапазоне события могут развиваться более стремительно. Так, по данным исследования компании Yankee Group, число абонентов систем MMDS (эту систему можно рассматривать как составляющую IEEE 802.16a) к 2006 году в США составит около 900 тыс. (в 45 раз больше, чем в 2000 году) [1]. Но о спецификации IEEE 802.16a мы поговорим в следующей публикации.

*(Продолжение следует)*

## ЛИТЕРАТУРА

1. [www.wireless.ru/wireless/wrl\\_analysys5](http://www.wireless.ru/wireless/wrl_analysys5)
2. Голышко А. В. Телевидение: от кабельного к эфирному и далее... – Сети и системы связи, 1998, №3.
3. Гольдштейн Б.С. Протоколы сети доступа. Т.2. – М.: Радио и связь, 1999.

**Внимание, обнаружена ошибка**

в статье: И.Иммореев, А.Судаков. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи. Совместная работа в общей полосе частот. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №2. Расчетная формула мощности, излучаемой изотропным источником (см. стр. 37):  $P_r [дБм] = E [дБмкВ/м] + 20 \cdot \log_{10} D [м] - 104,8 = P^* [дБпВт] - 90 + 2,1$ . Соответствующие строки в таблицах 1 и 3 следует изменить как:

**Таблица 1**

f, МГц	P*, дБпВт	D, м	P <sub>r</sub> , дБм	W, Вт/Гц
1000–11700	57	–	-30,85	8,22 · 10 <sup>-13</sup>
11700–12500	50	–	-37,85	1,64 · 10 <sup>-13</sup>

**Таблица 3**

f, МГц	P*, дБпВт	D, м	P <sub>r</sub> , дБм	W, Вт/Гц
30,0–1000	-36	> λ/2	-33,85	4,12 · 10 <sup>-12</sup>
1000–40000	-30	> λ/2	-27,85	1,64 · 10 <sup>-12</sup>

\* – относительно полуволнового диполя.

Авторы благодарят за помощь В.П. Урдливиченко, НПФ "Гейзер".

**Россия выбирает стандарт, Япония приступает к цифровому ТВ-вещанию**

На заседании коллегии Минсвязи РФ 2 декабря 2003 года было принято судьбоносное для российского телевидения решение – национальным стандартом для цифрового телевизионного вещания в России станет европейская система DVB. Предпочтение новому стандарту было отдано после многолетних дебатов и сравнительных испытаний, а также пробного вещания в опытных зонах цифрового ТВ. Фактически выбирали из европейской системы DVB и разработанной в США ATSC. Отметим, что состоявшееся решение фактически лишь закрепило де-юре состоявшееся де-факто признание приоритета DVB большинством отечественных специалистов. Напомним, стандарт DVB предусматривает три модификации – наземного (DVB-T), кабельного (DVB-C) и спутникового (DVB-S) вещания. Немаловажно, что у ряда российских компаний уже есть опыт коммерческой работы с системами DVB-S DVB-C. Технически DVB-T основывается на использовании COFDM – мультиплексирования методом кодированных ортогональных несущих.

В то же время, 1 декабря в Японии приступила к работе первая в стране служба цифрового телевизионного вещания, в местном стандарте ISDB. В церемонии открытия принял участие премьер-министр Японии, который назвал это событие историческим моментом, не менее значительным, чем начало аналогового телевизионного вещания в Японии 50 лет назад. Зона цифрового вещания охватывает лишь три города общей численностью порядка 12 млн. чел. Пока, по оценкам экспертов, потенциальная аудитория цифрового телевидения составляет около 300 тыс. зрителей. Но лиха беда начало. Правительство Японии инвестировало в новую службу 1,6 млрд. долл. Оно рассчитывает, что цифровое вещание придаст новый импульс японской экономике, которая в последние годы переживает застой.

Собств. инф., с использованием материалов [www.ro1.ru](http://www.ro1.ru).

**Кто изобрел телефон?**

Практически все ответят на этот вопрос однозначно – Александр Грэтхем Белл, уроженец Шотландии, впоследствии перебравшийся в Канаду, а затем в США. В 1876 году он запатентовал метод передачи речи из одной точки в другую посредством электрического сигнала. Однако теперь по этому поводу возникли сомнения. Недавно (в октябре 2003 года) были обнародованы архивы лондонского Музея науки, которые обнаружил куратор музея по истории коммуникаций Джон Лиффен. Из найденных документов следует, что еще в 1863 году, за 15 лет до Белла, немец Филипп Райс успешно испытал аппарат под названием "Телефон", умевший

передавать голос на расстояние. "Немецкий "Телефон" мог передавать речь очень слабо. Он воспроизводил речь с хорошим качеством, но очень неэффективно. Если под телефоном вы имеете в виду устройство, которое позволяет общаться на любом расстоянии, тогда не Райс изобрел телефон", – говорит Джон Лиффен. Однако и изделие Белла не вполне соответствовало этому критерию.

Телефон Райса тестировала английская компания Standard Telephones and Cables (STC). Почему она умолчала об открытии, можно лишь гадать – например, не оценили перспективность по достоинству. Однако впоследствии умалчивание приняло целенаправленный характер, поскольку разглашение той давней истории, по мнению руководства STC, могло повредить репутации компании. В частности, во время борьбы STC за подряд от фирмы АТТ, ставшей правопреемницей Bell Company, председатель совета директоров STC полагал, что, обнародовав информацию об испытании немецкого устройства, он лишит STC шансов на получение выгодного контракта.

По материалам ВВС.

**Трансатлантический союз за cdma2000**

Крупнейший производитель ИС для сотовых телефонов – компания Texas Instruments (TI) и ведущий европейский производитель микросхем – корпорация STMicroelectronics (ST) объявили об объединении усилий и достижений в целях разработки гибкого и открытого решения для поддержки стандарта сотовой связи cdma2000 1X – одного из стандартов третьего поколения (3G).

Речь идет о создании аппаратно-программной платформы, на базе которой можно будет разрабатывать устройства стандарта cdma2000 1X. Для этого предполагается объединить существующие решения обеих компаний в области беспроводной связи. В качестве процессора цифровой обработки предполагается использовать ИС TBB5110 компании TI – цифровой baseband-процессор, поддерживающий как CDMA второго поколения (IS-95), так и cdma2000 1X. Среди возможностей TBB5110 – кодирование/декодирование голоса, поддержка передачи данных со скоростью до 153,6 Кбит/с и др. Вся обработка в аналоговом тракте и сопряжение с цифровым baseband-процессором возложены на ИС STw4200 от ST. Среди функций этой ИС – управление мощностью сигнала, управление энергопотреблением и зарядкой аккумуляторов, сигма-дельта-ЦАП/АЦП и др.

В качестве передатчика и приемника выбраны ИС TRF4320 TRF5320 от TI, соответственно. Это – двухдиапазонные устройства прямого преобразования, выполняющие функции модулятора/демодулятора и непосредственно связанные с антенной. Схема прямого преобразования (т.е. без промежуточной частоты) существенно уменьшает потребляемую мощность, сокращает число компонентов и удешевляет готовое устройство. Опытные образцы ИС уже представляются разработчикам.

В платформу входит встраиваемое ПО с поддержкой стека протоколов CDMA, а также необходимые средства разработки, отладки и тестирования. Новая платформа позволит легко интегрировать в телефон разнообразные функциональные возможности, включая поддержку видеокamеры, цветной дисплей, "полифонический" вызывной сигнал и т.д.

Если все сложится удачно для нового альянса, TI и ST сумеют потеснить крупнейшего сегодня производителя ИС для cdma2000 – компанию Qualcomm, фактически родоначальника сотовой телефонии с CDMA (одна фамилия главы этой компании – Витерби – говорит о многом).

По материалам компании Texas Instruments