

# СТАНДАРТ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА IEEE 802.16

## ДЛЯ ДИАПАЗОНОВ НИЖЕ 11 ГГц

Год назад мы начали рассказ о стандарте беспроводных широкополосных сетей передачи информации (БСПИ) городского масштаба IEEE 802.16 [1]. На тот момент логика повествования представлялась достаточно прозрачной – рассказать про канальный уровень (MAC) стандарта и методы работы в диапазоне 10–66 ГГц (что и было сделано), а затем перейти к рассказу о работе в диапазоне 2–11 ГГц, который описывал стандарт IEEE 802.11а. Однако сбыться планам помешала сама динамика событий в области широкополосных средств связи.

### ИЗ ГЕНЕАЛОГИИ СТАНДАРТОВ IEEE 802.16

Жизнь документа IEEE 802.16a "Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz" (Модификации протокола контроля доступа к среде передачи и дополнительные спецификации физического уровня для диапазона 2–11 ГГц) [2] была удивительно короткой – около года. Напомним, стандарты группы IEEE 802.16 включали три основных документа – собственно стандарт Международного института электроники и электротехники (IEEE) IEEE 802.16-2001 (Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems) [3], описывающий общие принципы сети и сосредотачивающийся на диапазоне 10–66 ГГц, и два дополнения – IEEE 802.16c-2002 [4] (особенности работы в диапазоне 10–66 ГГц) и IEEE 802.16a-2003 – сети в диапазоне 2–11 ГГц. Все три документа – IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16a и IEEE 802.16c – фактически представляли собой набор исправлений и дополнений к базовому стандарту IEEE 802.16. Разумеется, работать с тремя документами вместо одного неудобно. Кроме того, сразу же после публикации стандартов стали появляться многочисленные исправления и дополнения.

Кроме того, в отличие от ряда собратьев, IEEE 802.16 появился раньше, чем производители приступили к выпуску соответствующей аппаратуры и комплектов ИС. И практическая работа не могла не войти в противоречие с рядом положений стандарта. Труд учитывать поправки и дополнения взяла на себя Рабочая группа IEEE 802.16d IEEE. Непосредственно к работе по созданию единого документа, с учетом всех поправок она приступила 11 сентября 2003 года (рабочее название draft-версии того периода – IEEE 802.16REVd). Не прошло и года, как 24 июня 2004 года был официально утвержден новый стандарт – IEEE 802.16-2004 [5], заменяющий собой документы IEEE 802.16-2001, IEEE 802.16c-2002 и IEEE 802.16a-2003. Дата его публикации – 1 октября 2004 года.

### СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ СТАНДАРТА IEEE 802.16-2004

Новый документ – это компиляция уже существовавших стандартов, однако с достаточно серьезными изменениями и уточнениями



И.Шахнович

в отдельных разделах. Главным образом они затронули главы, входившие ранее в IEEE 802.16a. Стандарт описывает принципы построения сетей регионального масштаба в диапазонах до 66 ГГц – точнее, их физический и MAC-уровни. Для этого предусмотрено пять режимов (табл. 1). Из них только WirelessMAN-SC предназначен для работы в диапазоне 10–66 ГГц. Он ориентирован на магистральные сети ("точка-точка", "точка-многоточка"), работающие в режиме прямой видимости (ибо затухание столь высокочастотных сигналов при отражении очень велико) с типичными скоростями потока данных (bit stream) 120 Мбит/с и шириной канала порядка 25 МГц. Это фактически описанный в документе IEEE 802.16-2001 радиоинтерфейс широкополосного доступа с модуляцией одной несущей на канал (SC – single carrier), который мы рассматривали в предыдущей публикации [1].

Остальные режимы разработаны для диапазонов менее 11 ГГц. Один из них – WirelessMAN-SCa – это "низкочастотная" вариация WirelessMAN-SC (с рядом дополнительных механизмов, в частности допускается 256-позиционная квадратурная модуляция 256-QAM). Другой, WirelessHUMAN, предназначен для работы в безлицензионных диапазонах (главным образом в США). Зато два оставшихся режима – WirelessMAN-OFDM и WirelessMAN-OFDMA – это принципиально новые по отношению к IEEE 802.16-2001 методы, и на них-то мы и сосредоточим внимание.

Отметим, что все режимы диапазона ниже 11 ГГц отличаются три характерных детали – это механизмы автоматического запроса повторной передачи (ARQ – automatic repeat request), поддержка работы с адаптивными антенными системами (AAS – adaptive antenna system) и пространственно-временное кодирование (STC – space time coding) при работе с AAS. Кроме того, помимо централизованной архитектуры "точка-многоточка", в диапазоне ниже 11 ГГц предусмотрена поддержка архитектуры Mesh-сети ("сетки" – децентрализованной сети взаимодействующих друг с другом систем). Фактически Mesh-сеть является аналогом локальных ad-hoc-сетей стандарта IEEE 802.11. Примечательно, что если в документе IEEE 802.16a речь шла о диапазоне 2–11 ГГц, то в новом стандарте нижняя граница так четко не оговаривается (упоминается "как правило, не ниже 1 ГГц").

Таблица 1. Основные режимы в стандарте IEEE 802.16-2004

Режим	Частотный диапазон, ГГц	Опции	Метод дуплексирования
WirelessMAN-SC	10–66		TDD / FDD
WirelessMAN-SCa	< 11	AAS / ARQ / STC /	TDD / FDD
WirelessMAN-OFDM	< 11	AAS / ARQ / STC / Mesh	TDD / FDD
WirelessMAN-OFDMA	< 11	AAS / ARQ / STC /	TDD / FDD
WirelessHUMAN	< 11, безлицензионный диапазон*	DFS / AAS / ARQ / Mesh / STC	TDD

\*В США и Европе.



Еще одна особенность стандарта – режим WirelessHUMAN (High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network). Фактически он представляет собой адаптацию описанных в стандарте IEEE 802.16-2204 режимов для работы в безлицензионных диапазонах частот (видимо, в зоне 5–6 ГГц). Основные отличия WirelessHUMAN – это использование только временного дуплексирования, режим динамического распределения частот (DFS – dynamic frequency selection) и механизм сквозной нумерации частотных каналов. Однако поскольку в России безлицензионных диапазонов в гигагерцовой области нет, и ничего подобного нам не грозит, подробно останавливаться на данном режиме не будем.

Принципиально, что существенное внимание в стандарте IEEE 802.16-2004 уделено качеству обслуживания (QoS), а также механизмам защиты данных и соединений [5]. Учитывая, что IEEE 802.16 принципиально ориентирован на работу в лицензируемых диапазонах, а также его фактически общемировое признание (в Европе он принят ETSI под именем HiperMAN) и поддержку ведущих производителей СБИС и телекоммуникационного оборудования (объединившихся в WiMAX Forum), можно с большой степенью уверенности предположить, что в ближайшие годы нас ожидает новая волна "беспроводной революции"\* . И по своему размаху она может превзойти волны, порожденные появлением персональных компьютеров и сотовых телефонов.

### ПОВТОРЕНИЕ ПРОЙДЕННОГО – MAC-УРОВЕНЬ

Принципы организации работы с данными на MAC-уровне мы описали в предыдущей публикации [1], однако кратко напомним основные положения.

Стандарт IEEE 802.16 регламентирует работу на физическом и канальном уровнях. Для поддержки протоколов верхнего уровня (ATM, IP и др.) предусмотрен подуровень "преобразования сервиса", основная задача процедур которого – распознать и классифицировать тип данных для эффективной их передачи через сети IEEE 802.16. Для оптимизации транслируемых потоков предусмотрен специальный механизм удаления повторяющихся фрагментов заголовков PHS (Payload Header Suppression) пакетов или ATM-ячеек верхних уровней. 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.

Весь поток данных в сетях IEEE 802.16 – это поток пакетов. На основном подуровне MAC формируются пакеты данных (MAC PDU – MAC Protocol Data Unit, блоки данных MAC-уровня), которые затем передаются на физический уровень, инкапсулируются в физические пакеты и транслируются через канал связи. Пакет MAC PDU (далее – PDU) включает заголовок и поле данных (его может и не быть), за которым может следовать контрольная сумма CRC. 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 этом заголовке указывается идентификатор соединения (CID), тип и контрольная сумма заголовка, а также приводится информация о наличии в поле данных подзаголовков и сообщений ARQ.

Заголовок запроса полосы (также 6 байт) 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 нет.

Поле данных может содержать: подзаголовки MAC, управляющие сообщения и собственно данные приложений верхних уровней, преобразованные на CS-подуровне. MAC-подзаголовки могут быть пяти типов – упаковки, фрагментации, управления предоставлением канала, а также подзаголовки Mesh-сети и подзаголовки канала быстрой обратной связи (Fast Feedback).

Управляющие сообщения – это основной механизм управления системой IEEE 802.16. Всего зарезервировано 256 типов управляющих сообщений, из них используются 48. Формат управляющих сообщений прост – поле типа сообщения (1 байт) и поле данных (параметров) произвольной длины.

Описание профилей пакетов, управление доступом, механизмы криптозащиты, динамическое изменение работы системы и т.д. (т.е. все функции управления, предоставления доступа, запроса и подтверждения) реализуются через управляющие сообщения. Рассмотренные ниже карты входящего/нисходящего каналов (UL-/DL-MAP) также являются управляющими сообщениями.

Доступ к каналу предоставляется исключительно базовой станцией по предварительному запросу. Начальная инициализация АС и запрос канала происходят на основе механизма конкурентного доступа в специально отведенных для этого временных интервалах. БС назначает АС время и длительность доступа к каналам в зависимости от типов данных и приоритетов. Канальный ресурс конкретной АС может изменяться посредством опроса (поллинга) со стороны БС (т.е. БС предоставляет АС окно для запроса ресурсов) или специальных управляющих сообщений со стороны АС при очередной передаче данных (подробнее см. в [1]).

### РЕЖИМ WirelessMAN-OFDM

На физическом уровне стандарт IEEE 802.16 предусматривает три принципиально различных метода передачи данных: метод модуляции одной несущей (SC, в диапазоне ниже 11 ГГц – SCa), метод модуляции посредством ортогональных несущих OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) и метод мультиплексирования (множественного доступа) посредством ортогональных несущих OFDMA (orthogonal frequency division multiple access).

Режим OFDM – это метод модуляции потока данных в одном частотном канале (шириной 1–2 МГц и более) с центральной частотой  $f_c$ . Деление же на каналы, как и в случае SC – частотное. Напомним, что при модуляции данных посредством ортогональных несущих в частотном канале выделяются  $N$  поднесущих так, что  $f_k = f_c + k\Delta f$ , где  $k$  – целое число из диапазона  $[-N/2, N/2]$  (в данном случае  $k \neq 0$ ). Расстояние между ортогональными несущими  $\Delta f = 1/T_b$ , где  $T_b$  – длительность передачи данных в символе.

Помимо данных OFDM-символ включает защитный интервал длительностью  $T_g$ , так что общая длительность OFDM-символа  $T_s = T_b + T_g$  (рис. 1). Защитный интервал представляет собой копию оконечного фрагмента символа. Его длительность  $T_g$  может составлять

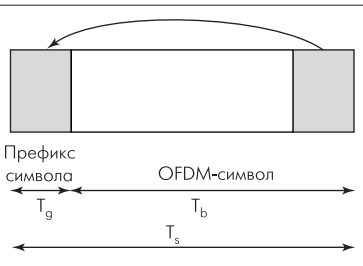


Рис. 1. OFDM-символ

1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 от  $T_b$ .

Каждая поднесущая модулируется независимо посредством квадратурной амплитудной модуляции. Общий сигнал вычисляется методом обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) как

\*Отметим, что европейский стандарт HiperMAN, равно как и WiMAX Forum, рассматривает лишь один из режимов стандарта IEEE 802.16-2004, а именно режим OFDM в диапазоне менее 11 ГГц.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{i2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} C_k e^{i2\pi k \Delta f (t-T_g)} \right\}$$

( $0 < t < T_g$ ), где  $C_k$  – комплексное представление символа квадратурной модуляции (QAM-символа). Комплексное представление удобно, поскольку генерация радиосигнала происходит с помощью квадратурного модулятора в соответствии с выражением  $s_k(t) = I_k \cos(2\pi f_c t) - Q_k \sin(2\pi f_c t)$ , где  $I_k$  и  $Q_k$  – синфазное и квадратурное (целое и мнимое) значения комплексного символа, соответственно.

Для работы алгоритмов БПФ/ОБПФ желательно, чтобы количество точек соответствовало  $2^m$ . Поэтому число несущих выбирают равным минимальному числу  $N_{FFT} = 2^m$ , превосходящему  $N$ . В режиме OFDM стандарта IEEE 802.16  $N = 200$ , соответственно  $N_{FFT} = 256$ . Из них 55 ( $k = -128 \dots -101$  и  $101 \dots 127$ ) образуют защитный интервал на границах частотного диапазона канала. Центральная частота канала ( $k = 0$ ) и частоты защитных интервалов не используются (т.е. амплитуды соответствующих им сигналов равны нулю).

Из остальных 200 несущих восемь частот – пилотные (с индексами  $\pm 88, \pm 63, \pm 38, \pm 13$ ), остальные 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 предусмотрена (опционально) возможность работы не во всех 16, а в одном, двух, четырех и восьми подканалах – некий прообраз схемы множественного доступа OFDMA. Для этого каждый подканал и каждая группа подканалов имеют свой индекс (от 0 до 31).

Длительность полезной части  $T_b$  OFDM-символа зависит от ширины полосы канала BW и системной тактовой частоты (частоты дискретизации)  $F_s$ :  $F_s = N_{FFT}/T_b$ . 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 – мощное средство борьбы с межсимвольными помехами (межсимвольной интерференции, МСИ), возникающими вследствие неизбежных в городских условиях переотражений и многолучевого распространения сигнала. МСИ приводит к тому, что в приемнике на прямо распространяющийся сигнал накладывается переотраженный сигнал, содержащий предыдущий символ. При модуляции OFDM переотраженный сигнал попадает в защитный интервал и вреда не причиняет. Однако этот механизм не предотвращает внутрисимвольную интерференцию – наложение сигналов с одним и тем же символом, прошедших с фазовой задержкой. В результате информация может полностью исказиться или (например, при фазовом сдвиге на  $180^\circ$ ) просто исчезнуть. Для предотвращения потери информации при пропадании отдельных символов или их фрагментов стандарт IEEE 802.16 предусматривает эффективные средства канального кодирования.

Кодирование данных на физическом уровне включает три стадии – рандомизацию, помехозащитное кодирование и перемежение. Рандомизация – это умножение блока данных на псевдослучайную последовательность (ПСП), которую формирует генератор ПСП с задающим полиномом вида  $1 + x^{14} + x^{15}$ .

В нисходящем потоке генератор ПСП инициализируется с началом кадра посредством кодового слова  $4A80_{16}$ . Начиная со второго пакета кадра генератор ПСП инициализируется на основе идентификационного номера базовой станции BSID, идентификатора про-

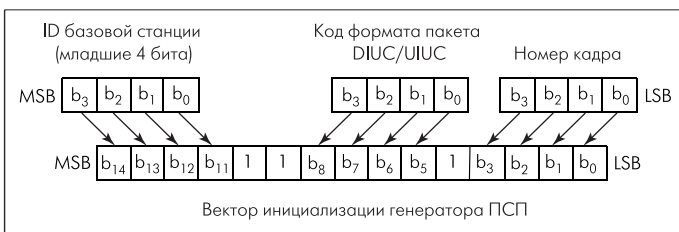


Рис.2. Формирование вектора инициализации генератора ПСП для рандомизации нисходящего потока OFDM

филя пакета DIUC (downlink interval usage code) и номера кадра (рис.2). В восходящем потоке все происходит аналогично, с той лишь разницей, что инициализация генератора ПСП по схеме, приведенной на рис.2, происходит с первого пакета (вместо DIUC используется UIUC – uplink interval usage code).

Кодирование данных предполагает каскадный код с двумя стадиями – кодер Рида-Соломона из поля Галуа GF(256) и сверточный кодер. В базовом виде код Рида-Соломона оперирует блоками исходных данных по 239 байт, формируя из них кодированный блок размером 255 байт (добавляя 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  $2T$  первых проверочных байтов. Обязательные для поддержки в IEEE 802.16 варианты каскадного кода приведены в табл.2.

Таблица 2. Основные режимы в стандарте IEEE 802.16-2004

Модуляция	Блок данных до кодирования, байт	Кодер Рида-Соломона	Скорость кодирования сверточного кодера	Суммарная скорость кодирования	Блок данных после кодирования, байт
BPSK	12	(12,12,0)	1/2	1/2	24
QPSK	24	(32,24,4)	2/3	1/2	48
QPSK	36	(40,36,2)	5/6	3/4	48
16-QAM	48	(64,48,8)	2/3	1/2	96
16-QAM	72	(80,72,4)	5/6	3/4	96
64-QAM	96	(108,96,6)	3/4	2/3	144
64-QAM	108	(120,108,6)	5/6	3/4	144

После кодера Рида-Соломона данные поступают в сверточный кодер (рис.3) с порождающими последовательностями (генераторами кода)  $G_1 = 171_8$  (для выхода X) и  $G_2 = 133_8$  (для Y) – так называемый стандартный код NASA. Его базовая скорость кодирования – 1/2, т.е. из каждого входного бита он формирует пару кодированных бит X и Y. Упуская из последовательности пар элементы  $X_i$  или  $Y_i$ , можно получать различные скорости кодирования. Так, скорости 2/3 соответствует последовательность  $(X_1 Y_1 Y_2)$ , скорости 3/4 –  $(X_1 Y_1 Y_2 X_3)$ , 5/6 –  $(X_1 Y_1 Y_2 X_3 Y_4 X_5)$ .

Кодер Рида-Соломона не используется с двухпозиционной модуляцией BPSK (например, при начальной инициализации AC или

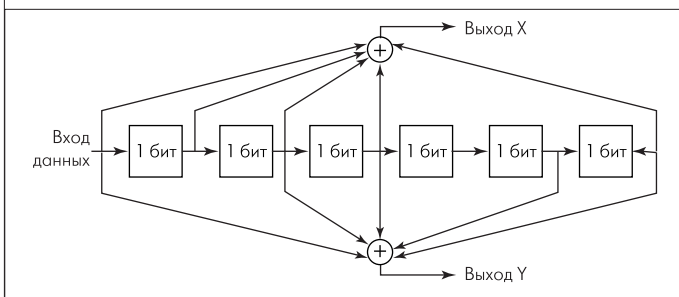


Рис.3. Схема сверточного кодера





запросе полосы). Он также пропускается, когда используется часть субканалов OFDM. В этом случае скорость сверточного кодирования принимается равной общей скорости кодирования (см. табл.2) (соответственно, размер исходного блока данных умножается на число используемых субканалов, деленное на 16).

Помимо описанного механизма кодирования стандарт предусматривает опциональное применение блоковых турбо-кодов (основанных на кодах Хемминга и контроле четности) и сверточных турбо-кодов.

После кодирования следует процедура перемежения – перемеживания битов в пределах блока кодированных данных, соответствующего OFDM-символу. Эта операция проводится в две стадии. Цель первой – сделать так, чтобы смежные биты оказались разнесенными по несмежным несущим. На второй стадии смежные биты оказываются разнесенными в разные половины последовательности. Все это делается для того, чтобы при групповых ошибках в символе повреждались несмежные биты, которые легко восстановить при декодировании. Перемежение реализуется в соответствии с формулами

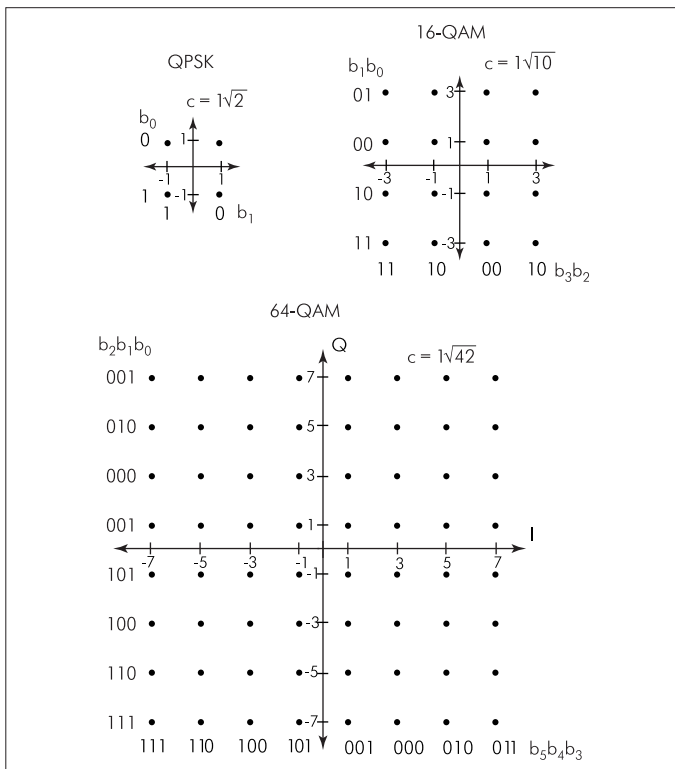
$$m_k = (N_{cbps} / 12) - (k \bmod 12) + \text{floor}(k / 12);$$

$$j_k = s - \text{floor}(m_k / s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(12m_k / N_{cbps})) \bmod s,$$

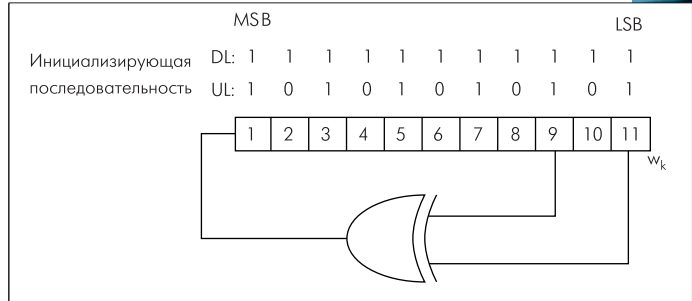
$$k = 0 \dots N_{cbps} - 1,$$

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

После перемежения начинается стадия модуляции. Исходя из выбранной схемы модуляции (BPSK / QPSK / 16-QAM / 64-QAM),



**Рис.4. Векторные диаграммы Грея (представление модуляционных символов) для BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM**



**Рис.5. Генерация модулирующей последовательности для пилотных несущих**

блок представляется в виде последовательности групп бит, соответствующих модуляционным символам (по 1 / 2 / 4 / 6 бит). Каждой группе ставится в соответствие значения  $Q$  и  $I$  из векторных диаграмм Грея (рис.4), которые затем используются при непосредственной модуляции несущей. Для усреднения амплитуд квадратурных символов используются нормализованные значения  $Q$  и  $I$ , т.е. умноженные на коэффициенты  $c$  (для QPSK  $c = 1/\sqrt{2}$ , для 16-QAM  $c = 1/\sqrt{10}$ , для 64-QAM  $c = 1/\sqrt{42}$ ).

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.5). Инициализирующие слова генератора ПСП для нисходящего и восходящего потоков различны ( $8F_{16}$  и  $555_{16}$ , соответственно). Собственно значения BPSK-символов вычисляются как  $c_{-88} = c_{-38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$ ;  $c_{-63} = c_{-13} = c_{13} = c_{38} = 1 - 2w_k$  в нисходящем канале и  $c_{88} = c_{38} = c_{13} = c_{38} = c_{63} = c_{88} = 1 - 2w_k$ ;  $c_{-63} = c_{-13} = 1 - 2w_k$  – в восходящем.

После определения модуляционных символов посредством ОБПФ вычисляется сам радиосигнал и передается в передатчик. При приеме все процедуры производят в обратном порядке.

В режиме OFDM на физическом уровне для сетей с архитектурой "точка-многоточка" кадровая структура передачи принципиально мало чем отличается от режима SC. Так же как и в высокочастотной области, информационный обмен происходит посредством последовательности кадров (фреймов). Каждый фрейм (рис.6) делится на два субкадра – нисходящий (DL – от БС к АС) и восходящий (UL – от АС к БС). Разделение на восходящий и нисходящий каналы – как временное (TDD), так и частотное (FDD). В последнем случае DL и UL транслируются одновременно, в разных частотных диапазонах.

Нисходящий субкадр включает преамбулу, управляющий заголовок кадра (FCH – frame control header) и последовательность пакетов данных. Преамбула в нисходящем канале – посылка из двух OFDM-символов (длинная преамбула), предназначенная для синхронизации. Первый OFDM-символ использует несущие с индексами 4, второй – только четные несущие (модуляция – QPSK).

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

В первый пакет входят широкоэмитательные сообщения (предназначенные всем АС) – карты расположения пакетов DL-MAP, UL-MAP, дескрипторы нисходящего/восходящего каналов DCD/UCD, другая служебная информация. Каждый пакет обладает своим профилем (схема кодирования, модуляция и т.д.) и передается по-

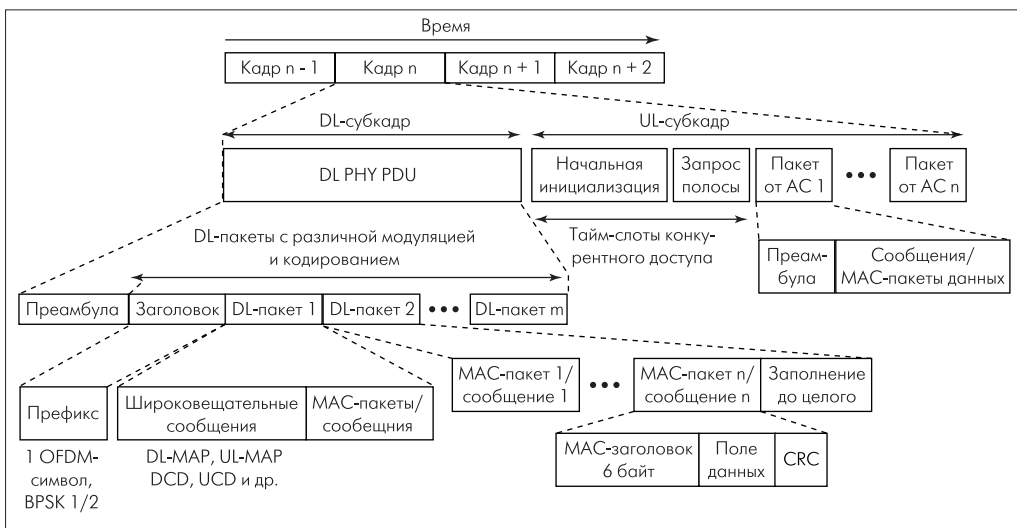


Рис.6. Структура OFDM-кадров при временном дуплексировании

средством 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 AC (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. AC 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; и 20 мс. Заданный базовой станцией, период построения кадров не может изменяться, поскольку в этом случае потребуются ресинхронизация всех AC.

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) AC может передать короткий 4-разрядный код на одном из 48 субканалов, каждый из которых включает четыре несущие. Всего предусмотрено восемь кодов. Таблица кодов и подканалов приведена в тексте стандарта IEEE 802.16. Код и номера канала AC выбирает случайным образом.

Получив кодовое сообщение, БС предоставляет AC интервал для передачи "обычного" запроса на предоставление доступа (заголовка запроса MAC-уровня) – если это возможно. Однако в отличие от других механизмов, БС в UL-MAP не указывает идентификатор запросившей ее станции, а приводит номера кода запроса, подканала, а также порядковый номер интервала доступа, в течение которого был передан запрос. По этим параметрам AC и определяет, что интервал для запроса полосы передачи предназначен ей. Выбор момента для передачи 4-разрядного кода запроса доступа происходит случайным образом, по описанному выше алгоритму обращения к каналу конкурентного доступа.

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

**MESH-СЕТЬ**

Формально Mesh-сеть – это вид топологии сети IEEE 802.16 в режиме OFDM, и ее физический уровень – это OFDM. Поэтому различия Mesh-сети с уже рассмотренными режимами проявляются не только, да и не столько на физическом уровне. Основное отличие Mesh-сети от рассматриваемой до сих пор архитектуры "точка-многоточка" – в том, что если в последнем случае AC может общаться только с БС, то в Mesh-сети возможно взаимодействие непосредственно между AC. Поскольку сети стандарта IEEE 802.16 ориентированы на работу с широкими частотными каналами, Mesh-сети вошли в стандарт вовсе не с целью создания одноранговых локальных сетей – для этого есть стандарты группы IEEE 802.11. Причина в ином – необходим инструмент построения широкополосной сети, в которой трафик может передаваться по цепочке из нескольких станций, ликвидируя тем самым проблемы передачи при отсутствии прямой видимости. Соответственно и все механизмы управления, в принципе позволяющие построить децентрализованную распределенную сеть, ориентированы все же на древовидную архитектуру, с выделенной базовой станцией (корневой узел) и доминирующими потоками БС-AC.

В Mesh-сети все станции (узлы) формально равноправны. Однако практически всегда обмен трафика Mesh-сети с внешним окружением происходит через один определенный узел (рис.7). Такой узел называют базовой станцией Mesh-сети, именно на него возлагается часть необходимых для управления Mesh-сетью функций. При этом управление доступом может происходить либо на основе механизма распределенного управления, либо централизованным способом, под управлением БС. Возможна и комбинация этих методов.

Базовое понятие в Mesh-сети – соседи. Под соседями определенного узла понимают все узлы, которые могут устанавливать с ним непосредственное соединение. Все они образуют соседское окружение. Узлы, связанные с заданным узлом через соседские узлы, называют соседями второго порядка. Могут быть соседи третьего порядка и т.д.

В Mesh-сети нет понятия восходящих/нисходящих каналов. Весь обмен происходит посредством кадров. Станции передают сообщения либо в отведенные им временные интервалы (в соответствии с предшествующим назначением каналов), либо получают доступ к каналам произвольным (случайным) образом. Каждый узел имеет уникальный 48-разрядный MAC-адрес. Кроме того, для иденти-

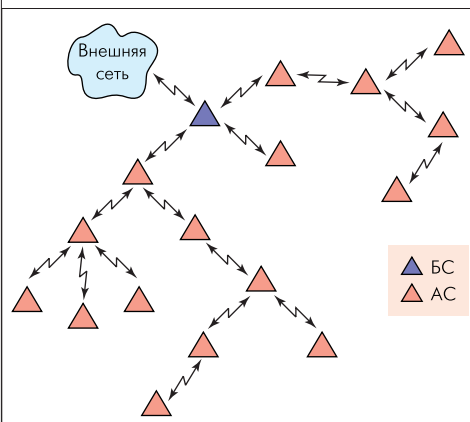
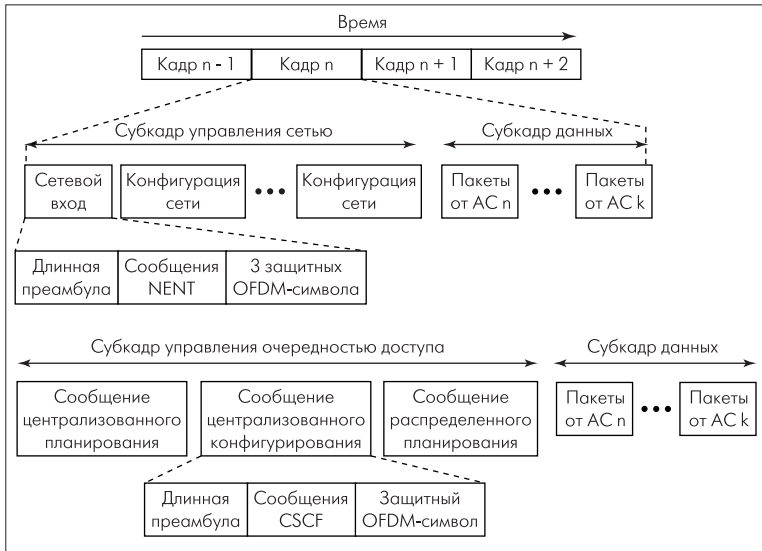


Рис.7. Пример Mesh-сети



**Рис.8. Структура кадра Mesh-сети**

фикации 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.8). Длина управляющего субкадра – переменная величина, задаваемая БС. Управляющий субкадр представляет собой набор пакетов MAC-уровня с тем отличием, что сразу после общего заголовка MAC-пакета следует подзаголовок Mesh-сети. Управляющий субкадр, в зависимости от 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 со скоростью кодирования 1/2.

Субкадры управления включают интервалы для подключения к сети новых устройств (Network entry – "сетевой вход") и следующие за ними сообщения "конфигурация сети". Сообщения типа "конфигурация сети" содержат всю необходимую информацию о составе сети. Они же реализуют процедуры управления. Эти сообщения генерирует каждый узел и транслирует по сети через свое соседское окружение. Среди передаваемой информации – списки соседей каждого узла, идентификационный номер БС и число ее соседей, номер логического канала для передачи графика доступа к каналам, удаленность узла (ранг соседства) от БС и т.д. Посредством таких сообщений с заданной периодичностью транслируется дескриптор сети – таблица, полностью описывающая текущие параметры сети. Среди них – длительность кадров, длина управляющего субкадра, число интервалов для сообщений децентрализованного распределения ресурсов, периодичность следования субпакетов распределения ресурсов, профили пакетов, тип кодирования, соответствие логических каналов физическим и т.п. Дескриптор сети передается от базовой станции ее соседскому окружению, от него – узлам со следующим рангом соседства и т.д. Периодичность передачи дескриптора сети нормирована.

"Сетевой вход" – это интервал, в течение которого новый узел может послать сообщение (NENT) о своем намерении подключиться к сети (аналог интервала конкурентного доступа в сети "точка-моготочка"). Перед этим он должен принять сообщение о конфигу-

рации сети, выбрать узел для подключения, синхронизироваться с ним и лишь затем отправлять запрос. В ответ узел либо откажет в доступе, либо назначит новому узлу сетевой идентификатор, канал и временной интервал для проведения процедур аутентификации.

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

Децентрализованное распределение ресурсов подразумевает, что распределение происходит в пределах одной группы соседей (т.е. между станциями, способными непосредственно связываться друг с другом). При координированном децентрализованном распределении узлы обмениваются между собой специальными сообщениями управления распределением (distributed scheduling – DSCH). Координированность заключается в том, что период выдачи таких сообщений каждой станцией определен и известен ее соседям. Координированные DSCH-сообщения пе-

редаются в субкадрах управления очередностью доступа в оговоренных в сетевом дескрипторе интервалах. Некоординированные DSCH-сообщения передаются в субкадре данных.

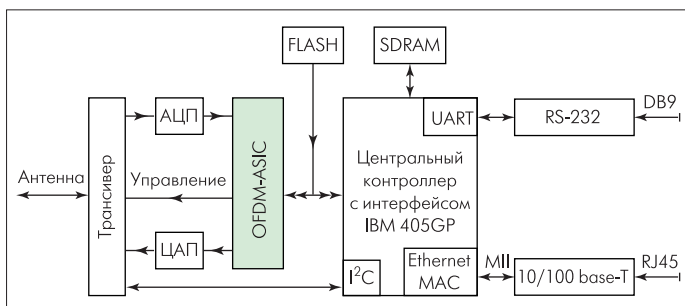
DSCH-сообщения – это запросы на получение канального ресурса и ответные сообщения с предоставлением (подтверждением) свободного ресурса (временного интервала в субкадре данных). Ресурс предоставляется соседом под конкретное соединение.

Централизованное распределение ресурсов подразумевает древовидную топологию сети с БС в вершине. Оно реализовано посредством двух типов сообщений – централизованного конфигурирования CSCF и централизованного планирования CSCH. Эти управляющие сообщения размещаются в начале субкадра управления графиком доступа. Используя сообщения централизованного планирования CSCH, каждый узел определяет потребность в трафике своих дочерних узлов (т.е. трафик которых от (к) БС проходит через данный узел) и сообщает свою потребность вышестоящему узлу – вплоть до БС. Проанализировав потребность, БС рассылает сообщение CSCH, информируя каждый узел о выделенной ему полосе пропускания (в бит/с) в восходящем и нисходящем направлениях. Исходя из этих данных, каждый узел уже сам запрашивает (или назначает) расположение пакетов в субкадре данных у (для) своих соседских узлов посредством сообщений децентрализованного планирования DSCH.

Сообщения централизованного конфигурирования CSCF формируются БС и транслируются по сети для информирования всех ее узлов о текущем состоянии. CSCF включает такую информацию, как число доступных логических каналов и их перечень, перечень узлов в сети с указанием числа дочерних узлов для каждого из них, а также профили восходящих/нисходящих пакетов для каждого дочернего узла.

## АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Несмотря на свой "младенческий" возраст, стандарт IEEE 802.16 уже начали поддерживать производители СБИС – правда, пока их единицы, и эти компании не из крупнейших. Видимо, первой на этот рынок свой продукт выпустила канадская фирма Wavesat (www.wavesat.com), еще в феврале 2003 анонсировавшая СБИС OFDM-модема DM110 (рис.9). Он был реализован в ASIC, т.е. методом заказного проектирования, в корпусе типа BGA-1156. Схема обладала возможностями, избыточными по отношению к требованиям IEEE 802.16. Так, поддерживалась модуляция 4-, 16- и 64-QAM, 1024-точечное БПФ, временное и частотное дуплексирова-



**Рис.9. Схема устройства на базе OFDM-модема DM110 компании Wavesat**

ние, формирование OFDM-пакетов с защитным кодированием. Допустимая ширина канала – от 3 до 7 МГц, скорость передачи данных – до 35 Мбит/с. Напряжение питания ядра и периферии составляло 2,5 и 3,3 В, соответственно.

В декабре 2004 года фирма Wavesat объявила о начале продаж своего нового OFDM-модема – СБИС DM256. СБИС реализована в корпусе PQFP-208 и принципиально отличается от предшественницы. DM256 оснащена ЦАП и АЦП (10 разрядов). Входной /выходной интерфейс 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 разработанные компанией механизмы временной и частотной синхронизации, поддерживается временное и частотное разделение каналов, в последнем случае – дуплексный и полудуплексный режимы. Ширина канала – 1,75; 3; 7 и 10 МГц, длительность защитного интервала – от 1/4 до 1/32 от длительности

OFDM-символа. На аппаратном уровне поддерживается кодек Рида-Соломона и декодер Витерби. Для построения оборудования на базе DM256 дополнительно необходим лишь ВЧ-трансммиттер и контроллер MAC-уровня. СБИС может использоваться как в БС, так и в абонентском оборудовании. Важно отметить, что DM256 совместима с требованиями грядущего расширения стандарта широкополосного доступа для мобильных приложений IEEE 802.16e.

*Продолжение следует.*

**ЛИТЕРАТУРА.**

1. Шахнович И. Сети городского масштаба: решения рабочей группы IEEE 802.16 – в жизнь! – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №8, с.50.
2. IEEE Std IEEE 802.16a-2003. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2: "Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz". – IEEE, 1 April 2003.
3. 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, 8 April 2002.
4. IEEE Std IEEE 802.16c-2002. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 1: Detailed System Profiles for 10–66 GHz. – IEEE, 15 January 2003.
5. 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.