

СТАНДАРТ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА IEEE 802.16-2004

РЕЖИМ OFDMA И АДАПТИВНЫЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ

В прошлом номере журнала мы приступили к рассмотрению стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 для диапазонов ниже 11 ГГц. Предлагаемая статья завершает наш краткий обзор [1, 2]. В ней рассматривается режим OFDMA и предусмотренные в стандарте механизмы поддержки адаптивных антенных систем.

Сразу отметим – текст документа IEEE 802.16-2004 [3] еще достаточно сырой, содержит противоречия и недосказанности. Видимо, неизбежны дополнения и уточнения. Поэтому данный цикл статей – это лишь краткое знакомство с основными механизмами стандарта, способное пролить свет на малую толику вопросов. Для сколь-нибудь глубокого понимания стандарта IEEE 802.16-2004 советуем обратиться к оригиналу [3], тем более что он абсолютно бесплатно доступен по адресу <http://standards.ieee.org>.

РЕЖИМ WirelessMAN-OFDMA

Режим WirelessMAN-OFDMA (далее – OFDMA), как следует из его названия, это метод множественного доступа посредством разделения ортогональных несущих. В отличие от рассмотренного в предыдущей публикации [2] метода WirelessMAN-OFDM, речь идет уже не только о механизме модуляции, но и о способе разделения каналов. Данный механизм уже достаточно хорошо известен, в частности, он нашел широкое применение в системах цифрового телевидения DVB (наземных, кабельных и спутниковых). Один логический OFDMA-канал образован фиксированным набором несущих, как правило, распределенных по всему доступному диапазону частот физического канала. В упрощенном виде этот механизм опционально используется в режиме OFDM – вспомним разбиение канала на 16 подканалов.

С точки зрения формирования модуляционных символов OFDMA аналогичен OFDM: OFDMA-символ включает собственно зону передачи данных и предшествующий ему защитный интервал (повтор начального фрагмента символа), предназначенный для предотвращения межсимвольной интерференции. Сам символ – это совокупность модулированных ортогональных несущих. В режиме OFDMA несущих значительно больше, чем в OFDM – 2048 вместо 256, соответственно и число подканалов становится достаточным для организации работы сети: в разных режимах их от 32 до 70, по 24 или 48 информационных несущих в каждом. Используются не все 2048 несущих – около 200 нижних и 200 верхних частот составляют защитный интервал канала и не модулируются. Также не ис-

И. Шахнович

пользуется центральная частота канала (частота с индексом 1024). Кроме того, часть несущих – пилотные, предназначенные для служебных целей, а не для передачи информации. Точное число пилотных несущих и частот в защитных интервалах незначительно варьируется в зависимости от режимов OFDMA, описанных далее.

Системная тактовая частота всегда составляет 8/7 ширины полосы физического канала BW. Ширина физического канала не нормирована (в стандарте говорится "не менее 1 МГц"), но в реальных применениях вряд ли окажутся эффективными каналы менее 5 МГц.

Особенности формирования символов и канального кодирования

Метод формирования, структура OFDM-символов и механизм канального кодирования в OFDMA схожи с описанными для OFDM [2]. 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 блочных и сверточных турбо-кодов. Метод перемежения также практически идентичен с OFDM:

$$m_k = (N_{cbps}/16) - (k \bmod 16) + \text{floor}(k/16);$$

$$j_k = s - \text{floor}(m_k/s) + (m_k + N_{cbps} - \text{floor}(16m_k/N_{cbps})) \bmod s,$$

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

где m_k и j_k – номер исходного k -го бита после первой и второй стадии перемежения, соответственно; N_{cbps} – число кодированных бит в OFDMA-символе, s – 1/2 числа бит на несущую (например, для QPSK $s = 2$). Функция $\text{floor}(x)$ – это 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 1/2 и 3/4, а также опционально 64-QAM со скоростями кодирования 1/2, 2/3 и 3/4. Однако в OFDMA после формирования символов квадратурной модуляции и нормировки их амплитуд последовательность символов на каждой несущей умножается на бинарную ПСП $\{w_k\}$, задающий полином генератора которой – $x^{11} + x^9 + 1$ (см. рис.5 в [2]). Каждая k -я несущая умножается на зна-

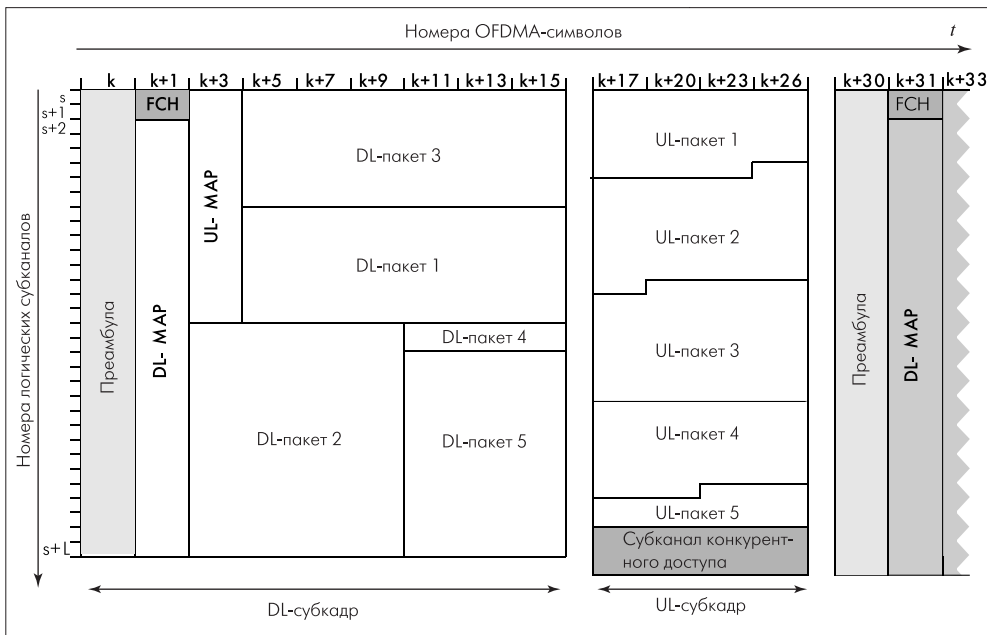


Рис. 1. Структура OFDMA-кадров

чение $1 - 2w_k$ (т.е. если $w_k = 0$, то $1 - 2w_k = 1$ и символ не изменяется; если $w_k = 1$, символ умножается на -1). Символы пилотных несущих модулируются методом BPSK, их значения вычисляются как $c_k = 1 - 2w_k$. Однако поскольку мощность сигналов пилотных несущих в нисходящем канале (опционально – и в восходящем) должна быть на 2,5 дБ выше средней мощности информационных несущих, значение c_k дополнительно умножается на $4/3$.

Структура кадров, методы формирования логических каналов

Структура кадров (рис. 1) в OFDMA схожа со всеми рассмотренными ранее режимами [1, 2] в том, что сохраняется подразделение на восходящий и нисходящий субкадры (как временное, так и частотное). Длительность кадра может составлять 2; 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5 и 20 мс. Кадр – это последовательность OFDMA-символов. Каждый OFDMA-символ включает набор подканалов. Пакеты данных могут передаваться одновременно, на различных OFDMA-подканалах.

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 – см. далее); в восходящем субкадре длительность слота всегда равна трем OFDMA-символам.

Подканал – это набор несущих частот (как и в OFDM). Распределение несущих по подканалам, равно как и число несущих на один подканал, зависит от направления передачи и метода распределения несущих. Стандарт IEEE 802.16 описывает несколько способов распределения несущих как в нисходящем канале, так и в восходящем. Принципиально они подразделяются на FUSC (full usage of the subchannels) – полное использование подканалов передатчиком БС, и PUSC (partial usage of subchannels) – использование групп подканалов (сегментов), т.е. не всего доступного диапазона. Какие именно подканалы используются в режиме PUSC, однозначно определяют номера сегментов.

В методах PUSC и FUSC (и их вариациях) одному субканалу присваиваются несущие, равномерно распределенные по всему доступному физическому каналу. Используется и другой подход –

применение в подканалах набора 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 в каждой. Центральная (пятая) частота в каждой группе – пилотная. Четыре соседних (по частоте) группы образуют полосу (band). Шесть групп в одной полосе образуют AMC-подканал. Понятие подканала в данном случае частотно-временное, т.е. подканал – это несколько (напри-

мер, два) OFDMA-символов и три несущие. Структура AMC-подканалов в восходящем и нисходящем субкадрах одинакова.

Отметим, что в пределах одного субкадра возможно использование различных механизмов распределения несущих по подканалам – FUSC, PUSC, AMC и т.д. Границы соответствующих зон (именуемых в стандарте зонами перестановки – permutation zone) определены в картах субкадров (рис.2).

Нисходящий OFDMA-канал

В нисходящем канале (см. рис.1) первый символ – это преамбула. Несущие в символах преамбул модулируются посредством BPSK специальным псевдослучайным кодом, зависящим от используемого сегмента (в режиме PUSC) и переменной IDcell, задаваемой на MAC-уровне [3]. В преамбуле модулируется каждая третья несущая всего канала (кроме несущих защитных интервалов и центральной), причем начальный сдвиг $[0..2]$ задается дополнительно. Распознав тип преамбулы, АС сразу определяет значение переменной IDcell и режим работы БС.

За преамбулой следуют два символа, передающие заголовок кадра FCH и карту распределения 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 заго-



Рис.2. Совмещение различных "зон перестановки" в OFDMA-кадре

ловком 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 АС.

Режим FUSC означает, что используются весь диапазон физического канала (все возможные несущие). Это 1702 несущие информационных частоты и защитный интервал (173 и 172 несущих вверху и низу диапазона, соответственно). Центральная частота с индексом 1024 не используется.

В режиме FUSC прежде всего назначаются пилотные частоты. Они подразделяются на фиксированные и переменные. Списки тех и других приведены в стандарте. Термин "переменные пилотные частоты" означает, что в каждом четном OFDMA-символе их индексы соответствуют приведенным в документе IEEE 802.16, в каждом нечетном – увеличиваются на 6 (нумерация OFDMA-символов начинается с 0). Всего предусмотрено 166 пилотных частот, из них 24 – фиксированные. И фиксированные, и переменные пилотные частоты разбиты на два набора, одинаковых по объему. Это разбиение имеет значение только при работе с адаптивными антенными системами в режиме пространственно-временного кодирования (STC).

После определения пилотных частот оставшиеся 1536 несущих предназначены для передачи данных. Они подразделяются на $N_{subchannels} = 32$ подканала по $N_{subcarriers} = 48$ несущих в каждом. Назначение информационных несущих подканалам происходит в соответствии с формулой

$$subcarrier(k, s) = N_{subchannels} n_k + \{P[(s + n_k) \bmod N_{subchannels}] + IDcell\} \bmod N_{subchannels}, \quad (1)$$

где $subcarrier(k, s)$ – индекс несущей k в подканале s , $s = [0 \dots N_{subchannels} - 1]$, $k = [0 \dots N_{subcarriers} - 1]$, $n_k = (k + 13s) \bmod N_{subcarriers}$; IDcell – идентификатор отдельного сегмента БС, определяемый на MAC-уровне (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). $P(x)$ означает x -ый элемент последовательности перестановок $\{P\}$, приведенной в стандарте ($P = \{3, 18, 2, 8, 16, 10, 11, 15, 26, 22, 6, 9, 27, 20, 25, 1, 29, 7, 21, 5, 28, 31, 23, 17, 4, 24, 0, 13, 12, 19, 14, 30\}$). Операция $x \bmod k$ – это остаток от x/k .

Очевидно, что перед применением приведенной формулы информационные несущие должны быть перенумерованы так, чтобы их индексы укладывались в диапазон 0–1535 (последнее значение соответствует физическому индексу 1702), т.е. пронумерованы подряд, без учета пилотных частот. Поскольку в четных и нечетных символах расположение пилотных частот различно, распределение информационных несущих для них также нужно вычислять независимо.

В **режиме PUSC** весь доступный диапазон подразделяется на 60 подканалов. По определению, для работы используется лишь часть из них, но не менее 12. Подканалы группируются в шести сегментах, из них три базовых (сегменты 0, 1 и 2), каждый включает 12 подканалов (0–11, 20–31 и 40–51 подканалы, соответственно). Очевидно, исходя из требования минимума в 12 подканалов, не базовые сегменты могут использоваться лишь совместно с базовыми. Деление на сегменты введено, чтобы БС было проще сообщать, в каких подканалах она работает (достаточно сообщить номера сегментов).

Символ в режиме PUSC формируется по следующему принципу. Всего предусмотрено 2048 частот, из них центральная (с индексом 1024) и защитные (184 нижних и 183 верхних) не используются. Ос-

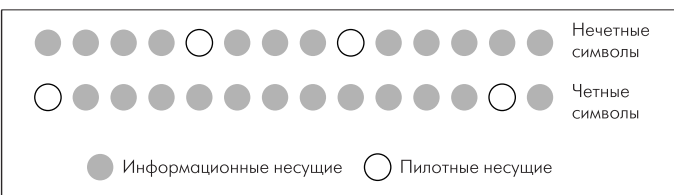


Рис.3. Структура кластера

тавшиеся 1680 несущих последовательно разбивают на 120 кластеров, каждый содержит 14 несущих. После этого последовательные физические кластеры перенумеровываются в "логические" в соответствии с формулой $LogicalCluster = RenumberingSequence [(PhysicalCluster + 13 IDcell) \bmod 120]$, где $RenumberingSequence(x)$ – соответствующий элемент приведенной в стандарте IEEE 802.16 последовательности перестановок, IDcell – определяемый на MAC-уровне идентификатор отдельного сегмента БС (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). Эта операция фактически означает перемежение – распределение последовательных групп несущих по всему диапазону физического канала. Далее логические кластеры разбиваются на шесть групп (0–23, 24–39, 40–63, 64–79, 80–103, 104–119), по 24 и 16 кластеров. Большие группы соответствуют большим сегментам (по умолчанию, группа 0 соответствует сегменту 0, группа 2 – сегменту 1, группа 4 – сегменту 2). В каждом кластере определяются пилотные несущие – для четных символов это 5-я и 9-я несущие, для нечетных – 1-я и 13-я (рис.3).

Таким образом, набору подканалов в пределах сегмента или нескольких сегментов оказывается поставленным в соответствии 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 в соответствии с формулой (1) каждому подканалу назначаются по 24 несущих. В данном случае в формуле (1) используются значения $N_{subchannels} = 12$ или 8, $N_{subcarriers} = 24$, а также специальные перестановочные последовательности P_{12} и P_8 для сегментов из 12 и 8 каналов, соответственно (приведены в стандарте [3]).

Кроме рассмотренных методов распределения несущих, в стандарте предусмотрены и опциональные механизмы – в частности, т.н. optional FUSC, принципиально не отличающийся от рассмотренного.

Восходящий канал

Восходящий субкадр следует непосредственно за нисходящим через интервал TTG. Он содержит пакеты от абонентских станций и интервал для запроса доступа/инициализации. Минимальный размер одного сообщения в восходящем субкадре (слот) – 3 OFDMA-символа в одном подканале. Это привело к появлению в документе IEEE 802.16 термина "фрагмент" (мозаичный элемент, tile).

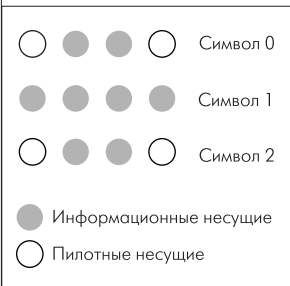


Рис.4. Структура "фрагмента" восходящего канала

Фрагмент представляет собой совокупность трех символов и четырех несущих, в котором положения пилотных частот жестко определены (рис.4). 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. Распределение фрагментов по подка-



налам происходит следующим образом. Все 420 фрагментов разбиваются на 6 групп по 70 фрагментов. В каждый подканал включается по одному фрагменту из каждой группы в соответствии с уравнением

$$\text{Tile}(n, s) = 70n + \{P[(n + s) \bmod 70] + \text{UL_IDcell}\} \bmod 70,$$

где $\text{Tile}(n, s)$ – фрагмент n подканала s , $n = [0...5]$, $s = [0...69]$. $P(x)$ – перестановочная последовательность, UL_IDcell – переменная в диапазоне 0–69, задаваемая БС на MAC-уровне. В результате каждому подканалу в каждом символе назначается свой набор несущих.

После распределения по подканалам происходит нумерация информационных несущих в каждом слоте – всего их в трех символах 48. Информационные частоты в подканале нумеруются начиная с наименьшей несущей фрагмента с наименьшим индексом – сначала в первом символе, затем во втором и третьем. Затем информационные несущие в каждом слоте перенумеровываются в соответствии с формулой $\text{subcarrier}(n, s) = (n + 13s) \bmod 48$, где s – номер подканала, $n = [0...47]$ (т.е. происходит циклический сдвиг нумерации информационных несущих на $13s$ в каждом подканале s).

Отметим, что в тексте документа IEEE 802.16 происходит подмена терминов: подканалом в восходящем субкадре авторы текста IEEE 802.16 называют именно слот, информационную структуру размером 24 несущих на 3 символа. И когда в документе – английским по белому – написано, что в субканале 48 информационных несущих, следует помнить, что с точки зрения правильной терминологии речь идет не о субканале, а о слоте. Реальных же несущих

(т.е. физических частот) в субканале всего 24. Умножая их на 3 (число OFDMA-символов в слоте) и вычитая 24 пилотные несущие, как раз и получим 48 информационных несущих. Понять все это сложно, но деваться некуда – увы, не Россия выступает законодателем мод в телекоммуникационных технологиях и стандартах.

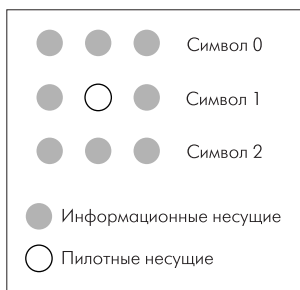


Рис.5. Структура "фрагмента" восходящего канала в опциональном режиме

Опционально в восходящем канале предусмотрен режим, в котором во фрагменте одна пилотная частота (рис.5), 6 фрагментов на подканал, всего 96 подканалов (1728 используемых частот).

Запрос полосы и регистрация в сети

Механизмы запроса начальной инициализации в сети и первичного запроса полосы пропускания в режиме OFDMA схожи – и принципиально отличаются от других режимов. Для этих запросов в OFDMA используется специально выделенный канал. Он назначается БС и состоит из шести последовательных подканалов, индексы которых приведены в UL-MAP. Запрос представляет собой 144-разрядный CDMA-код, передаваемый посредством BPSK, т.е. 1 бит на несущую в 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 UL_IDcell , остальные 9 – константа. Номер кода определяется начальной точкой (т.е. числом тактов генератора ПСП после инициализации) – всего предусмотрено 256 кодов. Причем БС использует только часть из всех возможных кодов – сначала N кодов начальной инициализации, за ними следуют M кодов периодичес-

кого определения параметров АС, далее L кодов запроса полосы. Для каждой БС задается точка начала этой последовательности $(N + M + L)$.

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

Успешно приняв и распознав CDMA-код (а этого может и не произойти, поскольку в интервале конкурентного доступа возможны коллизии при одновременной работе передатчиков нескольких АС), базовая станция не знает, от какой АС пришел запрос. Поэтому в ответ в UL-MAP следующего кадра она указывает номер принятого CDMA-кода, субканал и символ, в котором код был отправлен. Так АС определяет, что именно ее запрос принят, и понимает, что следующее за этим широкополосное сообщение с указанием диапазона запроса (номера символа, подканала и длительности) предназначено именно ей. В этом сообщении БС передает необходимые параметры для процесса инициализации в сети (включая идентификатор соединения CID, присвоенный MAC-адрес, набор физических параметров и др.). Далее в указанный в UL-MAP интервал АС приступает к штатной процедуре регистрации в сети.

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

ПОДДЕРЖКА АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Важнейшая особенность стандарта IEEE 802.16, принципиально отличающая его, скажем, от стандартов IEEE 802.11 a/b/g, – это наличие встроенных средств поддержки адаптивных антенных систем (AAS). Разумеется, применение AAS – это не обязательное требование стандарта. AAS – это системы с секторными направленными антеннами (метод формирования диаграмм направленности антенн в стандарте не оговаривается), т.е. антенные системы с несколькими антенными элементами. Применение AAS существенно увеличивает потенциальную емкость сети стандарта IEEE 802.16, поскольку в разных секторах БС возможна работа в одних и тех же каналах (частотных и OFDMA). Кроме того, направленные антенны позволяют существенно уменьшать общую излучаемую мощность. В результате снижается и межканальная интерференция. Не менее важно применение многоэлементных антенных систем для улучшения прохождения сигналов в каналах с замираниями – так называемых методов пространственно-временного кодирования (разнесения) STC.

Поддержка ASS в спецификации IEEE 802.16 означает модификацию протоколов на физическом и MAC-уровнях, наличие специальных управляющих и контролирующих сообщений для работы с адаптивными антеннами.

DL-субкадр				UL-субкадр		
Обычная преамбула	Заголовок	"Ненаправленные" пакеты	AAS-преамбула	AAS DL-зона	"Ненаправленные" пакеты	AAS UL-зона

Рис.6. Структура кадров с зоной AAS

Работа с направленными AAS

Стандарт допускает в рамках одного кадра транслировать как ненаправленный, так и направленный (посредством AAS) трафик (рис.6). Для разграничения зон не-AAS и AAS-трафика используются специальные сообщения. Принцип применения AAS в режимах OFDM и OFDMA (равно как и в SCa) достаточно схож. Наиболее полно он описан в стандарте для случая OFDMA [3], поэтому остановимся именно на нем.

Механизм Diversity-Map Scan. 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 и четвертый с начала и четвертый с конца подканалы в AMC). Сообщения в этих подканалах могут повторяться несколько раз – с тем, что если используется не ширококвещательная трансляция, а передача с переключением лучей, сообщения с префиксом дошли бы до всех AC. 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 AC 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 суперкадре входит по крайней мере один ширококвещательный кадр, содержащий дескрипторы и карты DL/UL-каналов. Смысл такого объединения – обеспечить минимум управляющих сообщений для группы кадров.

Перечисленные методы работы с AAS используют так называемый механизм Diversity-Map Scan – сканирование (абонентскими станциями) разнесенных карт распределения канальных ресурсов. В режиме OFDMA предусмотрен и другой способ работы с AAS – метод прямой сигнализации (Direct Signaling Method).

Метод Direct Signaling использует механизм последовательного распределения несущих AMC. Его особенность – 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 AC или групп AC. Благодаря точной пространственной настройке AAS данный метод позволяет в одном кадре передавать сообщения множеству пользователей.

В методе прямой сигнализации предусмотрены четыре специальных кодовых сообщения – обучения обратного соединения RLT (reverse link training), доступа в обратном соединении RLA (reverse link access), обучения прямого соединения FLT (forward link training) и иницирования прямого соединения FLI (forward link initiation). Первые два сообщения использует AC, вторые два – BC. Для начальной инициализации или запроса полосы AC посылает сообщение RLA в канале BWAA. Оно предшествует сообщениям запроса полосы или начального доступа и используется BC для точной настройки своей антенной системы на данную AC. В ответ BC передает сообщение FLI – уникальный код для каждой AC (BC может сама инициировать соединение, послав FLI). FLI транслируется в подканале, выделенном для данной AC. 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 BC на AC в данном подканале. В результате, выполнив все необходимые подстройки, BC и AC устанавливают соединение, в течение которого происходит обмен данными. Причем пакетам данных предшествуют тренировочные последовательности FLT (со стороны BC) и RLT (со стороны AC).

Пространственно-временное кодирование

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. несколько изменить условия его прохождения. В результате существенно возрастает вероятность безошибочного приема такого сигнала (после соответствующей первичной обработки в приемнике).

В стандарте IEEE 802.16 используется схема пространственно-временного разнесения, предложенная Аламоути [4]. Суть метода проста – выходной поток символов разбивается на два субпотока (например, четные и нечетные символы), обрабатываемые параллельно (рис.7). В передатчике используется два антенных канала, использующих общий тактовый генератор (что обеспечивает синхронность). Таким образом, реализуется так называемая схема канала MISO (Multiple Input / Single Output) – несколько входов и один выход (по отношению к каналу).

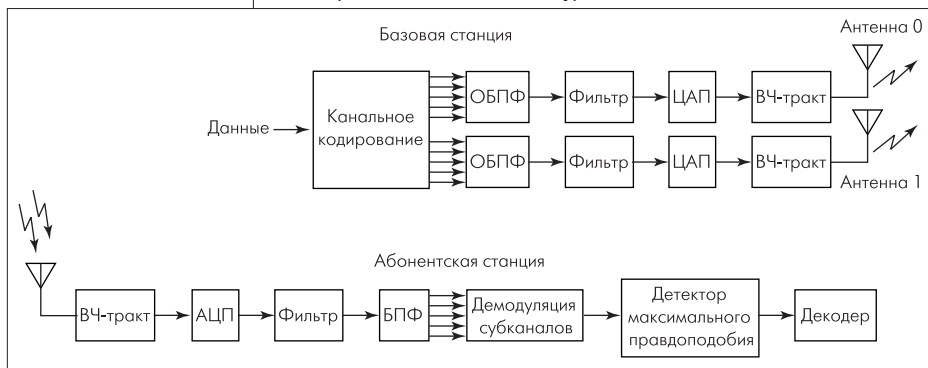


Рис.7. Метод пространственно-временного кодирования по схеме MISO

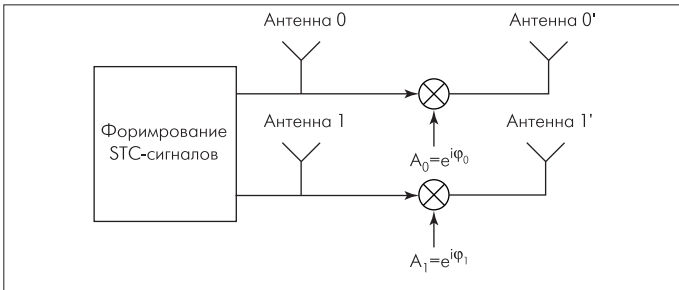


Рис.8. Схема STC с четырьмя передающими антеннами

Сначала антенна 0 (см. рис.7) транслирует символ S_0 , антенна 1 – символ S_1 . В следующий символьный 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 символьном интервале принимает сигналы r_0 и r_1 . Зная передаточные характеристики каналов (h_0 и h_1), в приемнике можно восстановить переданные сигналы S_0 и S_1 согласно формулам (разумеется, вычисленные значения являются некоторым приближением к исходным значениям S_0 и S_1):

$$S_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*$$

$$S_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^* .$$

Предполагается, что за время передачи двух символов передаточные характеристики не изменяются.

С точки зрения протоколов физического уровня, применение STC не требует особых действий. Зона, транслируемая посредством STC, помечается в DL-MAP каждого кадра.

Особенности STC в методе OFDMA

В методе OFDMA предусмотрен ряд особенностей реализации STC. Прежде всего, при формировании OFDMA-символов набор пилотных частот зависит от четности символа и номера антенного канала. Кроме того, поскольку в OFDMA разделение каналов – не частотное, в дополнение к пространственно-временному разнесению используется и частотное, посредством частотных скачков (frequency hopping diversity coding – FHDC). Суть данного механизма в следующем. Допустим, несущие в субканале X модулируются сигнальным вектором S_0 , в субканале $X + 1$ – вектором S_1 . Именно такой сигнал передает антенна 0. Антенна 1 транслирует сигнал, в котором несущие подканала X модулируются вектором $-S_1^*$, несущие подканала $X + 1$ – вектором S_0^* . Восстановление в приемнике происходит аналогично уже рассмотренному варианту STC, только вместо передаточных характеристик двух антенных каналов используются характеристики, связанные с субканалами X и $X + 1$. Под принятыми сигналами r_0 и r_1 понимают принятые сигналы в субканалах X и $X + 1$, соответственно. Из них восстанавливают S_0 и S_1 .

Очевидно, что данную методику можно перенести на пары субканалов – т.е. все субканалы OFDMA-символа разбиваются на смежные пары ($X, X + 1; Y, Y + 1; \dots$). В антенне 0 они передаются без изменений, в антенне 1 в каждой паре происходит описанное преобразование.

Все изложенные схемы преобразования можно описать матрицей

$$A = \begin{bmatrix} S_0 & -S_1^* \\ S_1 & S_0^* \end{bmatrix} .$$

Однако возможна и упрощенная схема:

$$B = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \end{bmatrix} , \text{ обеспечивающая, однако, двукратный выигрыш в}$$

скорости. Вид матрицы преобразования задается базовой станцией в картах соответствующих каналов.

Метод OFDMA допускает применение STC/FHDC не только в нисходящем, но и в восходящем канале. Кроме того, возможно применение STC на базе не только двух, но и четырех антенных элементов. В последнем случае помимо базовых антенн 0 и 1 (рис.8), добавляются антенны 0' и 1', сигнал в которых смещен по фазе (например, сигнал в антенне 0' $S_0' = S_0 \cdot e^{i\phi_0}$).

АППАРАТНАЯ ПОДДЕРЖКА РЕЖИМА OFDMA В СТАНДАРТЕ IEEE 802.16

Даже из краткого рассмотрения стандарта IEEE 802.16-2004 видно, что он предоставляет создателям аппаратуры достаточно широкие возможности, не оговаривая при этом конкретные способы реализации предусмотренных стандартом алгоритмов и механизмов. Фактически IEEE 802.16, как и положено стандарту, описывает самые общие правила игры, следуя которым, возможно производить совместимую аппаратуру. Если эта цель будет достигнута, нас ожидает небывалое оживление рынка средств беспроводного доступа, а также связанных с ним услуг. Доказательство тому – имена лишь некоторых членов международной организации WiMax Forum (занимающейся продвижением стандарта IEEE 802.16, причем пока – только в режиме OFDM), таких как Intel, Nokia, Analog Devices, Atheros Communications, Fujitsu Microelectronics America и многие другие.

Появляются и образцы серийной аппаратуры, поддерживающие отдельные режимы IEEE 802.16. Характерный пример – система BreezeMAX израильской компании Alvarion [5].

Более того, в низкочастотной области (менее 11 ГГц) некоторые производители объявили о создании соответствующей элементной базы. Именно в этом диапазоне события могут разворачиваться наиболее стремительно. Так, по данным исследования компании Yankee Group, число абонентов систем MMDS (эту систему можно рассматривать как составляющую IEEE 802.16) к 2006 году в США составит около 900 тыс. (в 45 раз больше, чем в 2000 году) [6].

Если говорить о режиме OFDMA, то лидером в производстве элементной базы можно считать израильскую фирму Runcom Technologies (www.runcom.com). Она выпустила СБИС RN-2234 – модем с поддержкой режима OFDMA стандарта IEEE 802.16 (рис.9). Данная СБИС реализует схемы модуляции QPSK, 16- и 64-QAM. Поддерживаются как турбо-коды, так и кодек 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.

Для режима OFDM уже представлены СБИС канадской фирмы Wawesat [2], компании Fujitsu Microelectronics, ожидается чипсет от компании Intel.

БУДУЩЕЕ СТАНДАРТА IEEE 802.16-2004

Уже не подлежит сомнению, что мы стоим на пороге новой эры – эры тотальных беспроводных телекоммуникаций. Уже разработаны технологии для персональных (группа стандартов IEEE 802.15), локальных (IEEE 802.11) и региональных сетей. Да, в них (особенно в стандарте IEEE 802.16) еще хватает неточностей и недосказанностей. Безусловно, вызывает большие вопросы проблема частотного присвоения – а для стандарта операторского класса, каким являет-

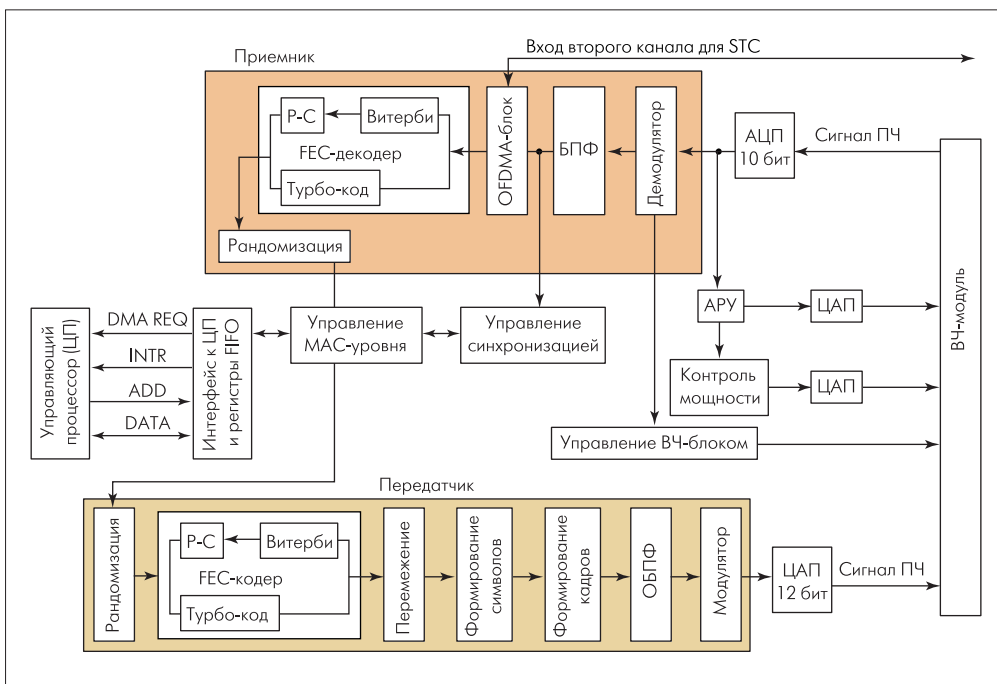


Рис.9. Структура СБИС RN-2234 OFDMA-модема компании Runcom

бильности могут оказаться диапазоны 2,7–3,5 ГГц и 700 МГц. Но это лишь прогнозы. Единственное, что можно утверждать уже сейчас – новые телекоммуникационные технологии вызовут неизбежный подъем технологий полупроводниковых. Причем как СВЧ-технологий, так и цифровых и смешанных. Широкие полосы предполагают сложные механизмы обработки в минимальных объемах при минимальных ценах. Глядишь, и 0,065-мкм технологическое разрешение окажется массово востребованным и даже недостаточным. Впрочем, все покажет уже ближайшее будущее. Жаль только, если электронные отрасли России в очередной раз окажутся чужими на этом празднике жизни.

ся IEEE 802.16, она попросту стала камнем преткновения. Пусть в высокочастотной части (в области миллиметровых волн) пока не решена проблема создания недорогой серийной аппаратуры. Но общая динамика, пожалуй, однозначно показывает, что будущее – за беспроводными технологиями.

Напомним, IEEE 802.16-2004 – это технология фиксированного доступа. Однако в течение года к этому стандарту должно появиться дополнение для мобильных приложений – спецификация IEEE 802.16e. И тогда, возможно, мы будем наблюдать противостояние двух технологий – мобильной телефонии третьего поколения, стремящейся в область высокоскоростной передачи данных, и систем широкополосной передачи, которые неизбежно вторгнутся епархию передачи голосового трафика, т.е. телефонии. По текущему состоянию, одна из наиболее трудных проблем на пути развития технологий мобильного широкополосного доступа – это отсутствие свободного частотного ресурса. По оценкам аналитиков, самыми вероятными с точки зрения мо-

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнович И. Сети городского масштаба: решения рабочей группы IEEE 802.16 – в жизнь! – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2003, №8.
2. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1.
3. 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.
4. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. – IEEE Journal on Select Areas in Communications, Oct. 1998, vol. 16, № 8, p. 1451–1458.
5. Колюшин С. Будущее беспроводного доступа: система BreezeMAX. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1
6. www.wireless.ru/wireless/wrl_analysys5

Однокристалльное Wi-Fi-решение от компании Texas Instruments

Компания Texas Instruments (TI), один из лидеров в области производства ИС для беспроводных устройств стандартов группы IEEE 802.11 (Wi-Fi), анонсировала новое законченное решение – однокристалльную платформу WiLink 4.0, представляющую собой комбинацию СБИС TNETW1251/TNETW1253 четвертого поколения для Wi-Fi и встроенное программное обеспечение.

Новая СБИС – это законченная однокристалльная система для Wi-Fi-устройств, интегрирующая MAC-контроллер, коммуникационный (baseband) процессор и ВЧ-трансивер. Она производится в двух модификациях: TNETW1251 поддерживает стандарты IEEE 802.11 b/g, а TNETW1251 – еще и IEEE 802.11a. СБИС производятся по 90-нм технологическому процессу и поставляются в корпусах типа BGA размером 6 x 6 мм.

Одно из важнейших назначений новой СБИС – мобильные телефоны, способные передавать голос по сетям Wi-Fi (тех-

нология Voice over WLAN – VoWLAN). Поэтому платформа WiLink 4.0 поддерживает VoWLAN на уровне встроенного ПО. Кроме того, предусмотрена совместная работа с устройствами Bluetooth.

Отметим, что сегодня VoWLAN – одна из наиболее новых и динамично развивающихся областей. По данным исследовательской компании Infonetics Research, в 2004 году было продано порядка 113 тыс. устройств VoWLAN на общую сумму свыше 45 млн. долл. Среди них – около 8 тыс. двухмодовых мобильных телефонов (6,6 млн. долл.), способных работать как в сетях сотовых операторов, так и во WLAN. Однако их продажи начались лишь в четвертом квартале минувшего года. Аналитики предрекают этому направлению необычайно бурный рост.

По материалам Texas Instruments и vnet.com