

ШИРОКОПОЛОСНАЯ МОБИЛЬНОСТЬ: IEEE 802.16e. ЧАСТЬ 2: ФИЗИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

Почти год назад [1] мы рассказали о новом дополнении "е" к стандарту IEEE 802.16-2004. Это дополнение позволяет создавать мобильные сети широкополосного беспроводного доступа (мобильный WiMAX). Статья была посвящена изменениям на MAC-уровне. Однако в тот момент приступить к рассказу об изменениях на физическом уровне и об аппаратной поддержке нового стандарта не удалось — почти никто из производителей не предоставлял информации о своей элементной базе для IEEE 802.16e. Прошел год, и ситуация изменилась. Поэтому мы возвращаемся к теме стандарта 802.16e и мобильного WiMAX.

ОТЛИЧИЯ НА ФИЗИЧЕСКОМ УРОВНЕ

На физическом уровне в документе IEEE 802.16e [2] не слишком много отличий от IEEE 802.16-2004 [3], но они весьма значимы. Если не вдаваться в технические детали, то суть изменений на физическом уровне — обеспечить большую гибкость для работы в полосах частот различной ширины. Фактически речь идет о максимально эффективном использовании частотного ресурса. Это очень важно для обеспечения мобильности абонентов, поскольку мобильному оператору вряд ли удастся получить частотную полосу шириной 20 МГц. Непосредственные изменения в стандарте коснулись только двух режимов — OFDM и OFDMA. Напомним, что OFDM — это метод модуляции, в то время как OFDMA (OFDM Access) подразумевает использование OFDM не только для модуляции, но и для мультиплексирования каналов (множественного доступа) [4, 5].

Режим OFDM

В режиме OFDM уточнен принцип применения субканалов. Напомним, что суть режима OFDM — использование модуляции OFDM (на основе 256 номинальных поднесущих) во всей полосе частот. Каналы мультиплексируются на основе временного разделения (TDMA), а дуплексирование (разделение приемного и передающего каналов) может быть как временным (TDD), так и частотным (FDD). Но изначально разработчики стандар-

И.Шахнович

та предусмотрели возможность использовать так называемые субканалы. Субканал образуют 12 информационных OFDM-поднесущих, всего возможно до 16 субканалов. Причем они могут объединяться. То есть в режиме OFDM предусмотрена опциональная возможность разделять общую полосу частот — некое приближение к OFDMA.

Однако об использовании этого режима в тексте стандарта IEEE 802.16-2004 сказано очень нечетко. Приведены правила канального кодирования при работе с субканалами, но и только. Кроме того, субканальный режим в соответствии с IEEE 802.16-2004 — это опциональная функция для работы только в восходящем канале, от абонентской станции (АС) к базовой станции (БС). Возможность назначения субканала была предусмотрена в управляющем сообщении, входящем в карту восходящего канала UL-MAP. Но ни в одном управляющем сообщении для нисходящего канала выбор субканалов не оговаривался. Почему — загадка: либо предполагалось, что выбор субканалов будет происходить до начала работы, путем начальных установок, либо вообще не предусматривалась такая возможность (например, считали, что субканальный режим будет использоваться только для упрощения начального подключения АС к сети). А может, просто не было ясного понимания и/или единства мнений по этому вопросу, поэтому данную опцию просто обозначили.

В стандарте IEEE 802.15e правила работы в субканальном режиме сформулированы более четко. Причем опциональное использование этой возможности предусмотрено и в нисходящем канале. В документе показано, что эта опция — некое упрощенное приближение к режиму мультиплексирования посредством OFDM, т.е. к режиму OFDMA. В соответствии с IEEE 802.15e, в нисходящем канале можно создавать субканальную зону (рис.1), в которой одновременно передается несколько пакетов, адресованных различным АС. Начало этой зоны обозначают специальные пакеты — преамбула субканальной зоны и заголовок субканальных пакетов (FCH), которые передаются в самом медленном режиме — с модуляцией QPSK и скоростью кодирования 1/2. Заголовок субканальных пакетов должен занимать 4 субканала. Номер группы этих субканалов по умолча-

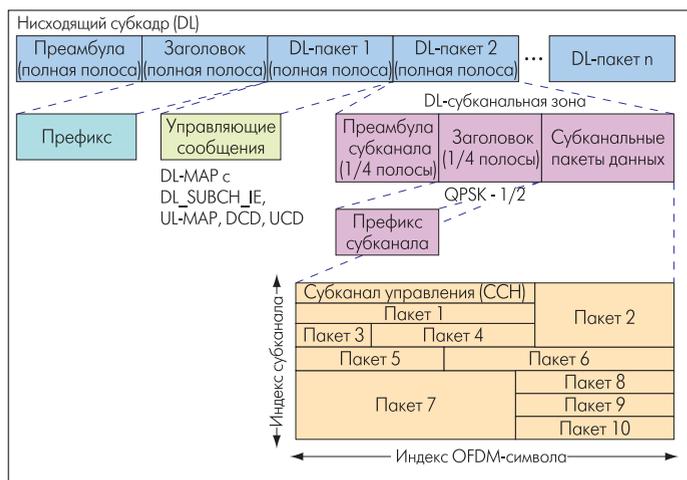


Рис.2. Структура субканальной зоны в нисходящем субкадре в режиме OFDM

нию определяется двумя младшими битами идентификатора БС. Заголовок содержит префикс субканальной зоны, в котором указываются параметры субканала управления (CCH – control subchannel): размер первого пакета в CCH, скорость его передачи, частота повторения CCH (один раз в субканальной зоне либо через каждые 4/8/16 OFDM-символов) и др. CCH – это область, в которой передается управляющая информация для работы в субканальной зоне (субканальные карты нисходящего и восходящего каналов, на основе которых АС определяют назначенные им пакеты). "Субканализированный" трафик следует сразу за заголовком. Само же начало субканальной зоны в восходящем и нисходящем каналах задается в картах этих каналов (DL-MAP и UL-MAP) управляющими сообщениями (например, DL_SUBCH_IE для нисходящего канала).

Режим OFDMA

Основные изменения в стандарте коснулись режима OFDMA как наиболее эффективного для мобильного доступа. Собственно, принципиально значимое изменение лишь одно – но очень важное. Если стандарт IEEE 802.16-2004 предусматривал режим OFDMA с 2048 номинальными поднесущими, то в дополнении IEEE 802.16e появился режим "масштабируемого OFDMA" (S-OFDMA). Он позволяет использовать 1024, 512 и 128 номинальных поднесущих. Режим с 256 поднесущими выпадает из этого ряда, поскольку тогда OFDMA становится аналогичным субканальному режиму в OFDM.

Принцип S-OFDMA позволяет работать в полосах частот различной ширины. Очевидно, чем уже полоса, тем меньше расстояние между номинальными поднесущими OFDMA. Соответственно уменьшается и допустимая скорость модуляции каждой из них. Но самое главное – снижается возможность противостоять межсимвольной интерференции, особенно для быстро движущихся абонентов (усиливается влияние доплеровского сдвига частот). То есть пропадает одно из ключевых достоинств OFDM-модуляции – возможность работать вне условий прямой видимости, с переотраженными сиг-

налами. Очевидное решение – пропорционально ширине полосы изменять число номинальных поднесущих. Особенно актуальна такая возможность для глобальных мобильных сетей, где АС приходится взаимодействовать с БС различных операторов или в различных регионах. Изменяя число поднесущих пропорционально полосе, можно обеспечить инвариантность относительно ширины рабочей полосы таких ключевых параметров, как длительность OFDM-символа и расстояние между поднесущими. Например, при переходе от 20-МГц полосы к 5-МГц полосе можно с работы на 2048 поднесущих перейти к 512 поднесущим. При этом (при прочих равных) общая пропускная способность системы снизится в четыре раза, но зато все остальные параметры останутся неизменными.

Однако с введением масштабируемой OFDMA стандарт требует, чтобы все мобильные устройства при первичной регистрации и при сканировании окружения могли определять размер рабочей полосы доступных базовых станций и число используемых или OFDM-поднесущих. Также с введением S-OFDMA изменяется и показатель передискретизации (в данном случае – отношение частоты дискретизации сигнала к ширине полосы). Если прежде он был фиксированным и равным 8/7, то теперь он принимает значение 28/25, если ширина рабочей полосы кратна 1,25; 1,5; 2 или 2,75 МГц. Если же полоса пропорциональна 1,75 МГц (и во всех остальных случаях), его значение составляет 8/7.

С появлением четырех различных вариантов номинального числа поднесущих в OFDMA для каждого из них составлены свои таблицы пилотных частот и адаптированы базовые формулы распределения поднесущих по логическим субканалам. Это весьма увеличило объем документа, но никак не изменило общих принципов стандарта IEEE 802.16-2004.

Еще одно значимое отличие – изменился порядок распределения слотов* в пакете (рис.2). Если IEEE 802.16-2004 предписывал сначала заполнять доступные слоты в одном субканале, затем – в следующем и т.д., то теперь все наоборот – сначала слотами заполняются все субканалы для одного OFDMA-символа, затем – для следующих OFDMA-символов (с шагом, соответствующим размеру слота).

В стандарт введены два новых метода распределения несущих по субканалам в нисходящем кадре – так называемые методы TUSC1 и TUSC2 (tile usage of subchannels – фрагментарное использование субканалов). Они практически аналогичны методам распределения несущих для восходящего канала, причем TUSC1 подобен основному методу, а TUSC2 – дополнительному опциональному методу. Оба метода исполь-

* Слот – минимальный информационный элемент в режиме OFDMA. Его размер (число подканалов и OFDM-символов) зависит от режима распределения поднесущих по субканалам (FUSC, PUSC, AMC и т.д.), а также от направления передачи (восходящий / нисходящий каналы). Например, в режиме FUSC в нисходящем канале слот занимает один субканал и один OFDMA-символ, а в восходящем канале в режиме PUSC – один субканал и три OFDMA-символа. Подробнее см. [5].

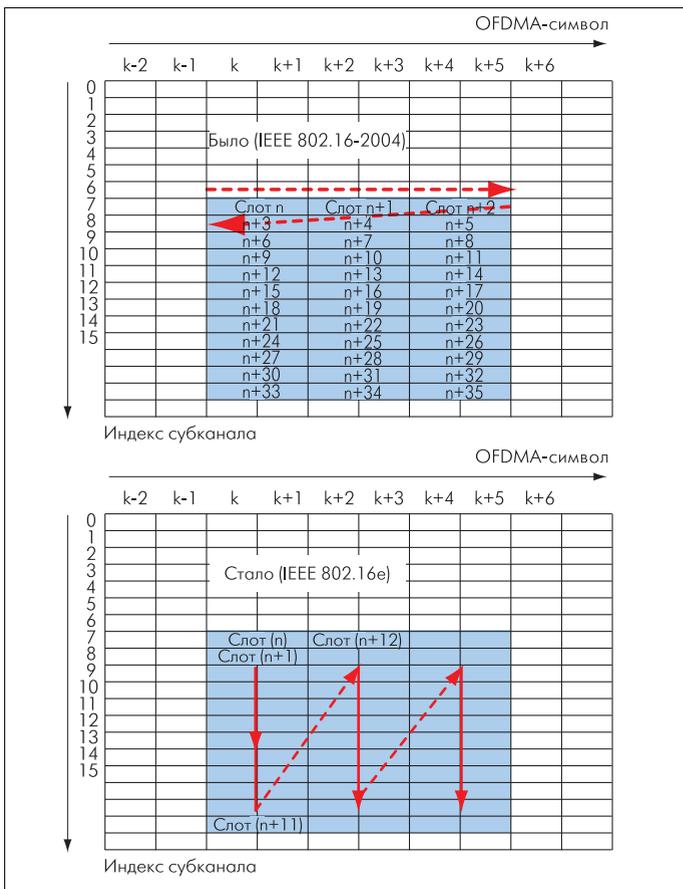


Рис.2. Порядок распределения слотов в OFDMA-пакете (в примере – нисходящий канал, PUSC-режим)

зуются только при работе с адаптивными антенными системами (в AAS-зоне).

В стандарт IEEE 802.16e в режиме OFDMA добавлен новый механизм – зондирование восходящего канала (uplink channel sounding). Его суть – по команде БС или по заданному расписанию мобильная АС передает специальное тестовое сообщение (на основе последовательности Голея). Трансляция ведется в особой выделенной зоне в восходящем субкадре. Причем эта зона может быть назначена многим АС. Мобильные станции передают тестовое сообщение либо на всех доступных поднесущих частотах, или на некоторых из них. В первом случае мультиплексирование различных АС происходит путем смещения момента начала трансляции (фазовый сдвиг). Различные АС могут использовать и разные поднесущие – например, каждую 16-ю, но с уникальным начальным сдвигом для каждой АС.

Антенные системы

Особое внимание в дополнениях IEEE 802.16e уделено системам MIMO – как в режимах пространственно-временного кодирования (STC), так и для адаптивных антенных систем (AAS).

В частности, добавлен абсолютно новый раздел, в котором режим макро-диверсифицированного хэндовера (Macro diversity handover – MDHO) [1] рассматривается как работа АС

в окружении нескольких БС, которые одновременно передают данной АС информацию. Такую систему можно рассматривать как частный случай пространственно-временного кодирования (STC). В качестве пространственно-разнесенных антенн выступают антенны различных БС.

Применение режимов STC подробно расписано для 2-, 3- и 4-антенных передающих станций, причем в различных режимах распределения субканалов – PUSC, FUSC, AMC и их вариаций. Напомним, что механизм STC используется как для увеличения скорости передачи данных (когда по каждому антенному каналу транслируется свой поток), так и для повышения надежности передачи в соответствии, например, с алгоритмом Аламути [3]. Возможность использовать от 2 до 4 антенн (3-антенный режим введен впервые) существенно повышает качество приема, что важно мобильным абонентам, для которых условия связи с БС могут постоянно меняться.

Примечательно, что для режимов с направленными адаптивными антенными системами (формирование диаграммы направленности) исключен механизм назначения канальных ресурсов посредством так называемой направленной сигнализации (Direct Signaling). Смысл изменения лежит на поверхности – метод Direct Signaling подразумевал точное знание того, в каком луче (где по отношению к БС) находится конкретная АС. Но для мобильных абонентов это условие практически трудновыполнимо, а потому излишне.

Важным дополнением в IEEE 802.16e стал и новый механизм канального кодирования. К уже существующим сверточному коду и опциональным блоковым и сверточным турбокодам добавлен код контроля четности с низкой плотностью LDPC (Low Density Parity Check). Этот код базируется на наборе линейных блоковых кодов. Принципиальной особенностью LDPC является гибкость. Он позволяет работать с кодовыми словами переменной длины и с различными скоростями кодирования. Так, в стандарте IEEE 802.16e определены размеры кодовых слов от 72 до 288 байт и скорости кодирования от 1/2 до 5/6. Размер кодируемого блока данных зависит от числа доступных субканалов и метода модуляции (т.е. от доступных частотных ресурсов и условий в канале).

Гибридный режим повторной передачи

Наконец, важное значение в IEEE 802.16e придается методу HARQ – гибричному механизму автоматического запроса на повторную передачу в случае ошибки (Hybrid Automatic Repeat Request). Напомним, что все стратегии трансляции данных с повторной передачей в случае обнаружения ошибки приема (ARQ) можно разделить на три типа:

- остановка и ожидание (Stop and Wait);
- при ошибке передать последние n пакетов (Go Back n, GBN);
- выборочный повтор передачи пакета (Selective Repeat, SR).

Метод Stop and Wait означает, что перед началом трансляции нового блока данных передатчик ожидает подтверждения



успешного приема предыдущего блока данных либо сообщения об ошибке. Метод надежный, но требующий существенных канальных ресурсов либо снижающий скорость обмена.

Механизм GBN не требует подтверждения каждого блока данных – передача идет непрерывно. Но если передатчик получает сообщение о пропущенном или принятом с ошибкой пакете, он повторяет передачу данных, начиная с поврежденного пакета. При этом даже успешно переданные пакеты транслируются повторно. Подобный механизм удобен тем, что не требует буферизации и хранения данных в приемнике, но в случае ошибки существенно возрастает загрузка канала. Из-за одного ошибочного пакета нормально принимаемые данные могут транслироваться многократно.

Алгоритм SR позволяет выборочно повторять передачу только поврежденных и пропущенных пакетов. Но в этом случае передатчик должен хранить определенное число последних принятых пакетов. Тем не менее, поскольку данный метод наиболее экономичен в отношении канальных ресурсов, он является основным в беспроводных телекоммуникационных технологиях. Именно метод SR и используется в стандарте IEEE 802.16 в рамках механизма ARQ.

Однако в стандарт вернулся и, казалось бы, забытый механизм Stop and Wait – фактически метод квитированной передачи. Поскольку он требует быстрого подтверждения/сообщения об ошибке, он используется только в режиме OFDMA, который позволяет выделить специальный канал для подтверждения передачи. Данный механизм назвали гибридным ARQ

(HARQ). Если HARQ включен, каждый пакет, переданный БС, требует подтверждения от АС по специальному обратному каналу. Такая опция может назначаться выборочным или всем соединениям определенной АС. Причем в случае мобильной АС HARQ позволено назначать только определенным соединениям, а не станции в целом.

Если приемник сообщает об ошибке или подтверждение успешного приема не получено в установленный срок, передатчик приступает к повторной передаче. Здесь можно задействовать один из двух альтернативных механизмов – передачу с увеличивающейся избыточностью (Incremental Redundancy – IR) или с "управляемым комбинированием" (Chase Combining – CC). Суть метода IR – при включенном механизме HARQ для каждого исходного пакета в канальном кодере формируется до четырех так называемых субпакетов, каждый со своим идентификатором (SPID). При использовании стандартного сверточного кодера [4] эти субпакеты отличаются лишь тем, что шаблон перфорирования* кодера для каждого последующего SPID циклически сдвигается влево на один разряд. Первым передается пакет с SPID=0. Если произошел сбой, повторно транслируется субпакет с другим SPID – т.е. тот же самый кодированный исходный пакет, но с иными параметрами кодера. Причем стандарт не предполагает изменения скорости кодирования.

Метод CC в случае ошибки предполагает повторную трансляцию одного и того же кодированного пакета. Он может использоваться только с мобильными АС. Почему метод так назван, можно лишь гадать. Вероятно, авторы документа имели в виду, что возможно корректное декодирование нескольких одинаковых пакетов, но с различными ошибками.

АППАРАТНАЯ ПОДДЕРЖКА

Успех любой современной технологии определяется наличием элементной базы. В полной мере это относится и к технологии IEEE 802.16e. Но в данной области, несмотря на очевидный прогресс, большого разнообразия предложений не наблюдается. Из производителей чипсетов с поддержкой "мобильного WiMax" [6] – т.е. режима OFDMA и требований дополнения IEEE 802.16e – можно назвать всего несколько компаний. Прежде всего это Intel, Runcom, Fujitsu, Sequans, Beceem, GCT Semiconductor. В последнее время о своем чипсете объявили представители компании Motorola, но подробностей не сообщалось, из чего можно предположить, что он создан для собственных изделий компании. Тем не менее, по данным анали-

* Сверточный кодер представляет собой устройство с одним входом (исходный поток бит) и с двумя выходами (X и Y). Каждому входному биту ставится в однозначное соответствие два выходных, т.е. формируется поток со скоростью кодирования 1/2. Для больших скоростей кодирования часть выходных битов исключается (перфорировается). Например, двум входным битам ставится в соответствие три выходных или пяти входным – шесть выходных. Шаблон, показывающий, какие именно биты отбрасываются, называется шаблоном перфорирования.

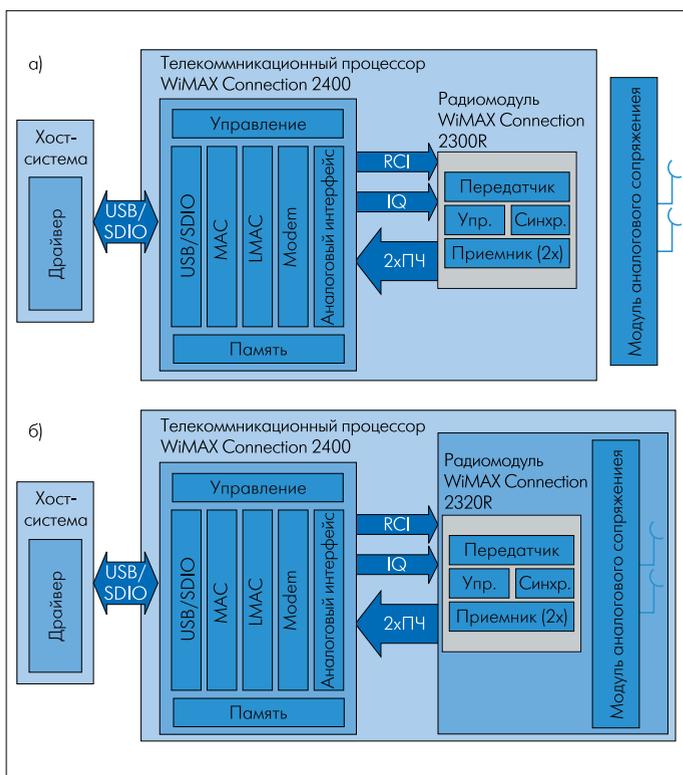


Рис.3. Построение АС на основе чипсета Intel WiMAX Connection: а) с внешним модулем аналогового сопряжения, б) используя радиомодуль WiMAX Connection 2320R

тической компании In-Stat (www.instat.com), в 2007 году рынок чипсетов для AC стандарта IEEE 802.16 составил 27 млн. долл., а для БС – 130 млн. долл. Причем к 2012 году аналитики данной компании предсказывают его рост до 500 млн. и 1,4 млрд. долл. соответственно.

В частности, Intel представил набор микросхем для абонентского оборудования WiMAX Connection, в состав которого входит ИС телекоммуникационного процессора WiMAX Connection 2400, а также две "системы в корпусе" – трехдиапазонный радиомодуль без блока аналогового сопряжения WiMAX Connection 2300R и полнофункциональный двухдиапазонный радиомодуль WiMAX Connection 2320R (рис.3). Этот чипсет предназначен в первую очередь для модулей Intel "Echo Peak", интегрирующих технологии IEEE 802.16e и IEEE 802.11 (мобильный WiMAX в диапазоне 2,5–2,7 ГГц и WiFi в диапазонах 2,4–2,48 и 5,1–5,8 ГГц).

Процессор WiMAX Connection 2400 реализует физический и MAC-уровни IEEE 802.16, модуль 2300R поддерживает диапазоны 2,4–2,4; 2,5–2,69 и 3,3–3,6 ГГц. Модуль 2320R работает в диапазонах 2,3–2,69 и 3,3–3,6 ГГц. Типовая пропускная способность решения на основе WiMAX Connection 2400 и 2320R – 6 Мбит/с в нисходящем канале и 2 Мбит/с – в восходящем (пиковые скорости – 20 и 5 Мбит/с, соответственно). Поддерживаются частотные полосы шириной 5; 7; 8,75; и 10 МГц. При этом мощность потребления в режиме ожидания – менее 5 мВт. Чипсет предназначен для работы с MIMO в конфигурации 2x2, сам чипсет поддерживает систему с одной передающей и двумя приемными антеннами.

Израильская компания Runcom также представила законченное решение, совместимое с IEEE 802.16e (режим OFDMA) – систему на кристалле RNA200 для абонентских

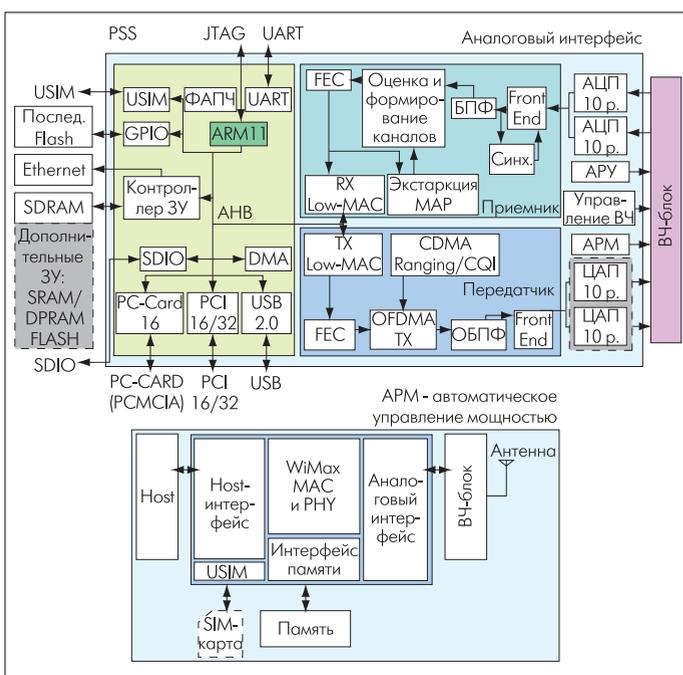


Рис.4. Система на кристалле RNA200 (Runcom)

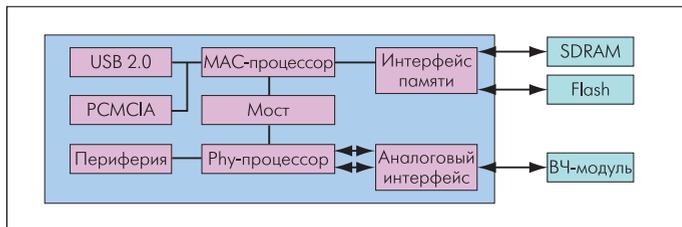


Рис.5. Система на кристалле RNA200 (Fujitsu)

станций (рис.4). ИС включает процессорное ядро семейства ARM11, модули аналоговой обработки, интерфейсные (цифровые и аналоговые) блоки. Чтобы построить законченную систему, дополнительно к RNA200 требуется только ВЧ-модуль и внешняя память (ОЗУ типа SDRAM и РЗУ программ). Реализован интерфейс SIM-карт. В качестве интерфейса к хост-системе реализован USB и SPI, а также Ethernet-порт.

RNA200 поддерживает работу в полосе до 20 МГц, режим временного дуплексирования, сверточное турбокодирование, ARQ, хэндовер и др. Процессор обеспечивает БПФ на 1024 точки, т.е. работу в режиме OFDMA с 1024 поднесущими. Таким образом, ИС предназначена для поддержки определенного WiMAX-профиля [6], а не режима OFDMA стандарта IEEE 802.16 как такового.

Очень похожую по структуре ИС для мобильного WiMAX представила и компания Fujitsu. Ее система на кристалле MB86K21 (рис.5) для AC поддерживает работу с 512 и 1024 поднесущими в режиме OFDMA, полосы шириной 5 и 10 МГц, режим MIMO 2x2 и т.п.

Весьма интересны и решения компании Sequans Communications – известного производителя чипсетов для фиксированного, а теперь – и мобильного WiMAX. Для БС компания предлагает заказную СБИС SQN2130. Ранее компания представила чипсет SQN2110, основанный на трех ПЛИС семейства Stratix II компании Altera и ее IP-блоках. SQN2130 – это телекоммуникационный процессор, поддерживающий физический и MAC-уровни стандарта IEEE 802.16 для режима OFDMA с 512 и 1024 несущими. Чип поддерживает два приемных и два передающих антенных канала, временное и частотное дуплексирование, скорость передачи до 35 Мбит/с. Энергопотребление в режиме MIMO – менее 2 Вт.

Для мобильных станций компания Sequans предлагает СБИС SQN1110 и SQN1130. В отличие от процессора для базовой станции, эти СБИС содержат интегрированный модуль аналоговой обработки, поэтому из внешних системных компонентов необходим только ВЧ-трансивер (рис.6). СБИС SQN1130 отличается чрезвычайно низким энергопотреблением – 280 мВт в рабочем режиме, менее 10 мВт в режиме ожидания. СБИС обеспечивает пропускную способность свыше 30 Мбит/с. В ней реализован режим OFDMA с 512 и 1024 поднесущими, временное дуплексирование (в SQN1110 – временное дуплексное и полудуплексное частотное разделение восходящего и нисходящего каналов).

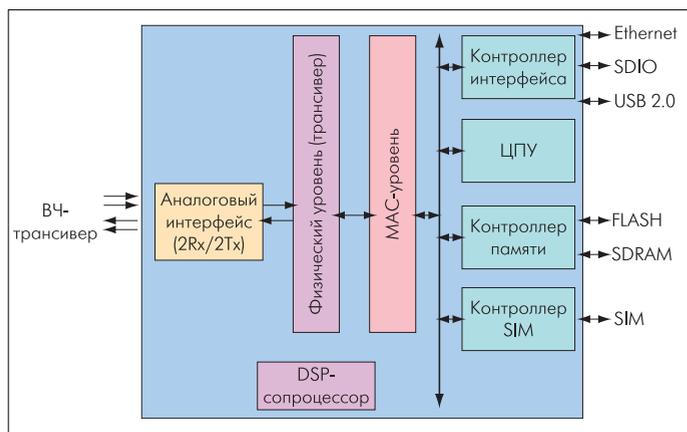


Рис.6. Структура СБИС SQN1130 (Sequans)

В качестве ВЧ-модуля для SQN1130 компания предлагает ИС ВЧ-трансивера SQN1140. Это двухканальный (для поддержки MIMO) трансивер прямого преобразования, предназначенный для работы в диапазоне 2,3–2,7 ГГц. В режиме двухканальной работы его потребление не превышает 290 мВт (195 мВт в одноканальном режиме).

Законченные чипсеты MS120 и BCS200 для мобильных AC предлагает и компания Весеет. Они ориентированы на требования первой и второй волны WiMAX-сертификации [6], соответственно. В состав каждого чипсета входят телекоммуни-

ционный процессор и ВЧ-трансивер. Так, чипсет BCS20 включает процессор BCSB120 и интегрированный ВЧ-трансивер BCSR120. Он позволяет строить системы для работы в 2- и 3-ГГц диапазонах с временным дуплексированием, поддерживает два приемных и один передающий антенный канал. Возможная ширина рабочей полосы – 5; 7; 8,75 и 10 МГц.

Помимо перечисленных производителей, многие компании предлагают решения для универсальных процессорных платформ, позволяющие поддержать требования стандарта IEEE 802.16. Это DSP-процессоры компаний Texas Instruments, Freescale, PicoChip и др. Причем PicoChip хоть и предлагает чрезвычайно оригинальные универсальные процессоры с сотнями (порядка 300) интегрированных DSP-ядер [7], но четко позиционирует их в сегменте WiMAX-продуктов. Неслучайно известный отечественный производитель систем широкополосного доступа – компания InfiNet Wireless (www.infinet.ru) – использует процессоры фирмы PicoChip в своих продуктах.

Кроме того, достаточно много предложений аналоговых приборов для WiMAX-систем, прежде всего – специализированных ВЧ-трансиверов. Характерный пример подобных изделий – семейство трансиверов прямого преобразования UXA234xx компании NXP (рис.7). Трансиверы этого семейства перекрывают частотный диапазон от 2,3 до 3,8 ГГц. Благодаря прямому преобразованию не нужны дополнительные филь-

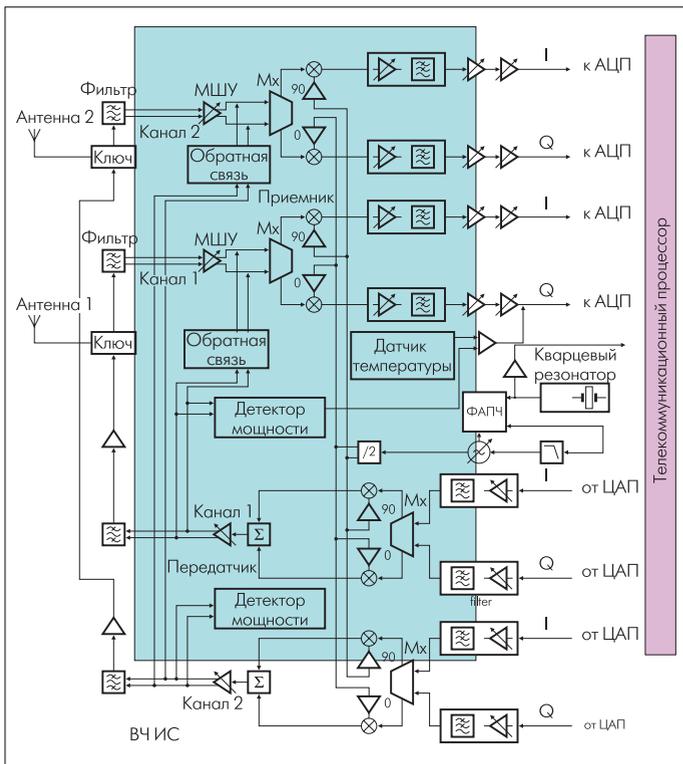


Рис.7. Трансивер прямого преобразования семейства UXA234xx (NXP) (структура и схема включения)

тры, что упрощает и удешевляет систему в целом. Усиление входного сигнала трансиверов (в зависимости от типа) – от 77 до 87 дБ, уровень шумов – от 2,5 до 3,5 дБ, диапазон усиления передатчика – 74 дБ. В зависимости от типа ИС поддерживается от одного до двух приемных и передающих каналов. Например, трансивер UXA23466 работает в диапазоне 2,3–2,7 ГГц, поддерживает по два приемных и передающих канала, а при напряжении питания 2,7–2,9 В ток потребления в режимах приема/передачи составляет от 81/182 мА. Отметим, что аналогичные решения предлагают также компании Maxim, Analog Devices и др.

Таким образом, уже сейчас можно констатировать, что производители элементной базы стремятся поддержать не стандарт IEEE 802.16 как таковой, и даже не его отдельные режимы (OFDM, OFDMA и S-OFDMA т.п.), а отдельные профили WiMAX, что далеко не одно и то же. Учитывая, что с частотными диапазонами для WiMAX полной определенности нет, следствием такого подхода может стать то, что в отдельных странах (например, в России) данную элементную базу использовать будет нельзя. Это приведет к необходимости применять универсальные аппаратные средства, неизбежно увеличивающие себестоимость устройств. Вероятно, по мере развития рынка WiMAX подобные лакуны с элементной базой будут заполнены.

В заключение отметим: несмотря на то, что в реальных системах используются лишь отдельные возможности и

режимы стандарта IEEE 802.16, новая технология живет и развивается. Подтверждение тому – решение ITU от 19 октября 2007 года о включении режима OFDMA TDD стандарта IEEE 802.16 в пул глобальных стандартов беспроводной связи IMT-2000 (IMT-2000 OFDMA TDD WMAN). При этом не стоит забывать, что WiMAX – не просто технология. Это новая парадигма построения информационного пространства. Насколько именно эта технология окажется успешной, например в конкурентной борьбе с перспективными стандартами сотовой связи (например, LTE), – большой вопрос. Но то, что в ближайшие несколько лет ее ожидает бурное развитие, несомненно. Кроме того, сам стандарт 802.16 не стоит на месте. В стадии создания и обсуждения находится ряд новых дополнений. Так, бурно обсуждается проект IEEE 802.16m, предполагающий улучшение беспроводного интерфейса для повышения скоростей обмена (до 100 Мбит/с), улучшения спектральной эффективности, качества связи, введения новых уровней мобильности и более эффективной поддержки больших групп пользователей. Вскоре ожидается появление уточненной версии стандарта IEEE P802.16Rev2, в которую войдут дополнения о многопролетных релейных сетях (802.16j) и ряд других документов. Будем ждать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахнович И. Широкополосная мобильность: IEEE 802.16e. Часть 1: MAC-уровень. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №2, с.18–27.
2. IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands. – IEEE, 28 February 2006.
3. IEEE Std 802.16-2004. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. – IEEE, 1 October 2004.
4. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1, с.8–14.
5. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16-2004. Режим OFDMA и адаптивные антенные системы. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №2, с.46–52.
6. Портной С., Иванов А. Выбор систем широкополосного беспроводного доступа. Мнение экспертов. – Первая миля, 2007, №2, с. 8–11.
7. Койнов А. Решения SDR для аппаратуры WiMAX. ПЛИС, DSP или нечто иное? – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007, №2, с.76–80.

