

Стандарт WiMAX: техническое описание, варианты реализации и специфика применения

Андрей АРХИПКИН
Andrey.Arhipkin@kedah.ru

Рассматриваемый в статье стандарт IEEE 802.16-2004 является расширением базового стандарта IEEE 802.16, который описывает работу в диапазоне 10...66 ГГц. В стандарте IEEE 802.16-2004 предусмотрена работа в диапазоне 2...11 ГГц, а также более широкие возможности как на физическом уровне, так и на уровне управления доступом.

Введение

Под аббревиатурой WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) понимается технология операторского класса, которая основана на семействе стандартов IEEE 802.16, разработанных международным институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). В стандартах IEEE 802.16 определяются физический уровень и уровень управления доступом для систем фиксированного беспроводного широкополосного доступа масштаба города. Основные параметры стандартов IEEE 802.16 и IEEE 802.16-2004 представлены в табл. 1 [1].

Описание стандарта

На физическом уровне в стандарте IEEE 802.16-2004 определены три метода передачи данных: метод модуляции одной несущей (SC), метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и метод множественного доступа на основе такого мультиплексирования (OFDMA).

Спецификация физического уровня WirelessMAN-OFDM является наиболее интересной с точки зрения практической реализации. Она базируется на технологии OFDM, что значительно расширяет возможности оборудования, в частности, позволяет работать на относительно высоких частотах в условиях отсутствия прямой видимости. Кроме того, в нее включена поддержка топологии «каждый с каждым»

(mesh), при которой абонентские устройства могут одновременно функционировать и как базовые станции, что сильно упрощает развертывание сети и помогает преодолеть проблемы прямой видимости.

Модуляция OFDM

При формировании OFDM-сигнала цифровой поток данных делится на несколько подпотоков, и каждая поднесущая связывается со своим подпотоком данных. Амплитуда и фаза поднесущей вычисляются на основе выбранной схемы модуляции. Согласно стандарту, отдельные поднесущие могут модулироваться с использованием бинарной фазовой манипуляции (BPSK), квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или квадратурной амплитудной манипуляции (QAM) порядка 16 или 64. Варианты отображе-

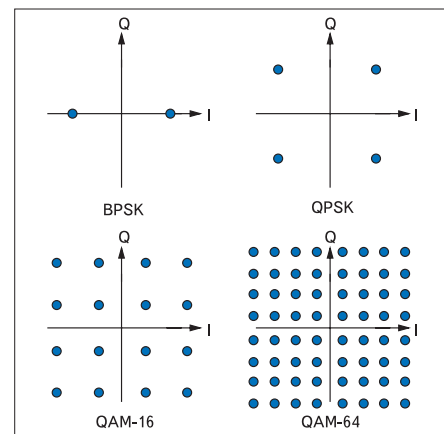


Рис. 1. Варианты отображения бит на фазовую плоскость

ния бит на фазовую плоскость для каждого вида манипуляции представлены на рис. 1. В передатчике амплитуда как функция фазы преобразуется в функцию от времени с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). В приемнике с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) осу-

Т а б л и ц а 1. Основные параметры стандартов IEEE 802.16 и IEEE 802.16-2004

Параметр	IEEE 802.16	IEEE 802.16-2004
Диапазон частот	10–66 ГГц	2–11 ГГц
Условия использования	Только прямая видимость	Прямая и непрямая видимость
Скорость передачи данных	32–134 Мбит/с	1–75 Мбит/с
Модуляция	Одна несущая (SC), манипуляция QPSK, QAM-16, QAM-64	Одна несущая (SC), манипуляция QPSK, QAM-16, QAM-64. OFDM 256 поднесущих, OFDMA 2048 поднесущих, манипуляция BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64, опционально QAM-256
Тип дуплекса	TDD/FDD	TDD/FDD
Ширина канала	20, 25, 28 МГц	1,25–20 МГц
Радиус зоны покрытия	2–5 км	4–6 км

шествуется преобразование амплитуды сигналов как функции от времени в функцию от частоты. Применение преобразования Фурье позволяет разделить частотный диапазон на поднесущие, спектры которых перекрываются, но остаются ортогональными. Ортогональность поднесущих означает, что каждая из них содержит целое число колебаний на период передачи символа. Как видно из рис. 2, спектральная кривая

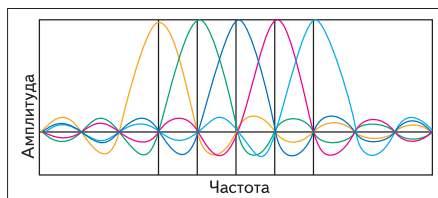


Рис. 2. Ортогональные поднесущие

любой из поднесущих имеет нулевое значение для «центральной» частоты смежной кривой. Именно эта особенность спектра поднесущих и обеспечивает отсутствие между ними интерференции [2].

Одним из главных преимуществ метода OFDM является его устойчивость к эффекту многолучевого распространения. Эффект вызывается тем, что излученный сигнал, отражаясь от препятствий, приходит к приемной антенне разными путями (рис. 3), вызывая межсимвольные иска-

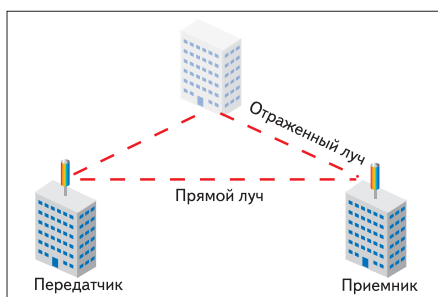


Рис. 3. Иллюстрация эффекта многолучевого распространения

жения. Этот вид помех характерен для городов с разноэтажной застройкой из-за многократных отражений радиосигнала от зданий и других сооружений. Для того чтобы избежать межсимвольных искажений, перед каждым OFDM-символом вводится защитный интервал, называемый циклическим префиксом. Циклический префикс представляет собой фрагмент полезного сигнала, что гарантирует сохранение ортогональности поднесущих (но только в том случае, если отраженный сигнал при многолучевом распространении задержан не больше, чем на длительность циклического префикса). Кроме того, циклический префикс позволяет выбрать окно для преобразования Фурье в любом месте временного интервала символа (рис. 4) [2].

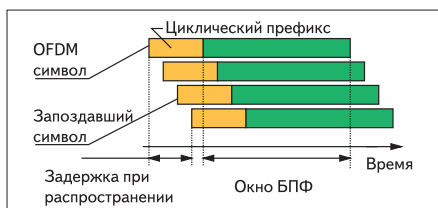


Рис. 4. Обработка OFDM-символа при многолучевом распространении

Помехоустойчивое кодирование

Многолучевое распространение радиосигнала может приводить к ослаблению и даже полному подавлению некоторых поднесущих вследствие интерференции прямого и задержанного сигналов. Для решения этой проблемы используется помехоустойчивое кодирование. В стандарте IEEE 802.16-2004 предусмотрены как традиционные технологии помехоустойчивого кодирования, так и относительно новые методы. К традиционным относится сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби и коды Рида-Соломона. К относительно новым — блочные и сверточные турбокоды. Для увеличения эффективности кодирования без снижения скорости кода применяется перемежение данных. Перемежение увеличивает эффективность кодирования, поскольку пакеты ошибок дробятся на мелкие фрагменты, с которыми справляется система кодирования.

Гибкость

Важной особенностью физического уровня является возможность выбора ширины для полосы пропускания канала. Стандарт предусматривает выбор ширины полосы с шагом от 1,25 МГц до 20 МГц со множеством промежуточных вариантов, что позволяет более эффективно использовать радиочастотный спектр. Кроме того, в стандарт заложена адаптивная сигнально-кодированная конструкция, то есть система подстраивается к характеристикам канала в каждый момент времени, «перекачивая» скорость в помехоустойчивость и наоборот. В соответствии со стандартом, в зависимости от отношения сигнал/шум (S/N) система выбирает метод модуляции, при котором может быть обеспечена устойчивая работа (рис. 5) [1].

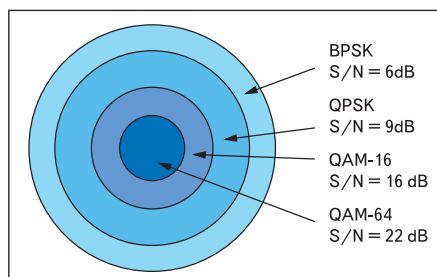


Рис. 5. Предпочтительный метод модуляции в зависимости от отношения сигнал/шум

Дополнительными инструментами физического уровня для повышения эффективности использования радиоспектра служат измерение качества канала и автоматическое управление мощностью сигнала.

Метод доступа

В стандарте IEEE 802.16-2004 используется технология множественного доступа с разделением по времени (TDMA), согласно которой базовая станция выделяет абонентским станциям временные интервалы, чтобы они могли передавать данные в определенной очередности, а не случайным образом.

Для реализации дуплексного режима обмена данными используются две технологии: дуплексный режим с разделением по времени (TDD) нисходящего и восходящего потоков и дуплексный режим с разделением по частотам (FDD). Защита информации

В соответствии со стандартом, для предотвращения несанкционированного доступа и защиты

пользовательских данных осуществляется шифрование всего передаваемого по сети трафика. Базовая станция (БС) WiMAX представляет собой модульный конструктив, в который при необходимости можно установить несколько модулей со своими типами интерфейсов, но при этом должно поддерживаться административное программное обеспечение для управления сетью. Данное программное обеспечение обеспечивает централизованное управление всей сетью. Логическое добавление в существующую сеть абонентских комплектов осуществляется также через эту административную функцию.

Абонентская станция (АС) представляет собой устройство, имеющее уникальный серийный номер, MAC-адрес, а также цифровую подпись X.509, на основании которой происходит аутентификация АС на БС. При этом, согласно стандарту, срок действительности цифровой подписи АС составляет 10 лет. После установки АС у клиента и подачи питания АС авторизуется на базовой станции, используя определенную частоту радиосигнала, после чего базовая станция, основываясь на перечисленных выше идентификационных данных, передает абоненту конфигурационный файл по TFTP-протоколу. В этом конфигурационном файле находится информация о поддиапазоне передачи (приема) данных, типе трафика и доступной полосе, расписание рассылки ключей для шифрования трафика и прочая необходимая для работы АС информация. Необходимый файл с конфигурационными данными создается автоматически, после занесения администратором системы АС в базу абонентов, с назначением последнему определенных параметров доступа.

После процедуры конфигурирования аутентификация АС на базовой станции происходит следующим образом:

- Абонентская станция посылает запрос на авторизацию, в котором содержится сертификат X.509, описание поддерживаемых методов шифрования и дополнительная информация.
 - Базовая станция в ответ на запрос на авторизацию (в случае достоверности запроса) присылает ответ, в котором содержится ключ на аутентификацию, зашифрованный открытым ключом абонента, 4-битный ключ для определения последовательности, необходимый для определения следующего ключа на авторизацию, а также время жизни ключа.
 - В процессе работы АС через промежуток времени, определяемый администратором системы, происходит повторная авторизация и аутентификация, и в случае успешного прохождения аутентификации и авторизации поток данных не прерывается.
- В стандарте используется протокол PKM (Privacy Key Management), в соответствии с которым определено несколько видов ключей для шифрования передаваемой информации:
- Authorization Key (AK) — ключ, используемый для авторизации АК на базовой станции;
 - Traffic Encryption Key (TEK) — ключ, используемый для криптозащиты трафика;
 - Key Encryption Key (KEK) — ключ, используемый для криптозащиты передаваемых в эфире ключей.
 - Согласно стандарту, в каждый момент времени используются два ключа одновременно, с перекрывающимися временами жизни. Данная мера необходима в среде с потерями

пакетов (а в эфире они неизбежны) и обеспечивает бесперебойность работы сети. Имеется большое количество динамически меняющихся ключей, достаточно длинных, при этом установление безопасных соединений происходит с помощью цифровой подписи. Согласно стандарту, криптозащита выполняется в соответствии с алгоритмом 3-DES, при этом отключить шифрование нельзя. Опционально предусмотрено шифрование по более надежному алгоритму AES [3, 4].

Разработка оборудования WiMAX на базе «систем на кристалле»

Современные тенденции развития телекоммуникационного рынка диктуют разработку так называемых «систем на кристалле». Под устройствами класса «система на кристалле» в общем случае понимаются устройства, на едином кристалле которых интегрированы один или несколько процессоров, некоторый объем памяти, ряд периферийных устройств и интерфейсов, — то есть максимум того, что необходимо для решения поставленных перед системой задач. Разработка «систем на кристалле» предполагает оптимизацию разрабатываемой схемотехники, что непосредственно сказывается на потребляемой мощности, площади кристалла и, как следствие, стоимости.

На текущий момент ведущие мировые производители сосредоточились на разработке «систем на кристалле», в которых интегрированы основные функции физического и MAC уровней стандарта WiMAX. Первые образцы, разработанные на основе спецификации IEEE 802.16-2004, представили компании Fujitsu, Intel, Sequans Communications, Wavesat и PicoChip. В предлагаемых этими компаниями решениях на физическом уровне используется модуляция OFDM с 256 под-

несущими и основная схема кодирования, в которой для внутреннего кода применяется сверточное кодирование и декодирование по алгоритму Витерби, а для внешнего — коды Рида-Соломона.

Функционально оборудование WiMAX разделяется на базовое и абонентское. Первое поколение чипов для базовых станций обладает меньшим уровнем интеграции, чем для абонентских станций. Для реализации MAC-протокола базовой станции требуется увеличение производительности этих решений. Для этой цели используются внешние процессоры, служащие для выполнения верхнего уровня MAC-протокола. Таким образом, чипсеты WiMAX реализуют функции физического уровня и функции нижнего уровня MAC-протокола.

Абонентское оборудование

Для разработчиков абонентского оборудования WiMAX наиболее перспективными являются «системы на кристалле» от четырех производителей: Fujitsu, Intel, Sequans и Wavesat.

Компания Intel первой предложила разработчикам «систему на кристалле» PRO/Wireless 5116 для абонентских станций WiMAX, в которой были интегрированы функции как физического, так и MAC уровней. Чип MB87M3400 компании Fujitsu предназначен для более широкого диапазона приложений и позволяет разрабатывать как базовое, так и абонентское оборудование. Компания Sequans разработала отдельные чипы SQN1010 и SQN2010 — для базового и абонентского оборудования соответственно.

«Системы на кристалле» от Fujitsu, Intel и Sequans полностью реализуют функции MAC-протокола для абонентских станций WiMAX. Другой подход к разработке предложила компания Wavesat, выпустив две

микросхемы: OFDM-модем DM256 (реализует функции физического уровня) и MC336 (представляет собой вычислительное ядро, реализующее нижний уровень MAC-протокола). Для разработки абонентского модема на базе «системы на кристалле» от Fujitsu, Intel и Sequans не требуется дополнительного внешнего процессора.

Характеристики рассматриваемых чипов, определяемые типом дуплекса, шириной канала и другими параметрами, сильно отличаются. Для организации полнодуплексной работы на базе решения Fujitsu MB87M3400 требуется использование двух чипов. Микросхема Sequans SQN1010 является первой «системой на кристалле», которая поддерживает полнодуплексный режим работы. Решение компании Wavesat DM256/MC336 также позволяет организовывать полнодуплексный режим работы на основе одной микросхемы OFDM-модема DM256.

Микросхемы компаний Fujitsu и Sequans позволяют организовывать каналы шириной до 20 и 28 МГц соответственно, тогда как максимальная ширина канала для чипов Intel и Wavesat составляет 10 МГц с промежуточными значениями 3,5 и 7 МГц.

Радиоинтерфейс рассмотренных «систем на кристалле» содержит блоки АЦП/ЦАП для прямого аналогового соединения с внешним приемопередатчиком. В табл. 2 представлены основные параметры решений для разработки абонентского оборудования WiMAX [6].

Базовые станции

Рассмотрим варианты разработки базовых станций WiMAX на основе известных чипов. Компания Fujitsu разработала чип MB87M3400 как для базовых, так и для абонентских станций. Однако, в отличие от решения Intel, чип Fujitsu имеет интерфейс для внешнего процессора. Для реализации полнодуплексного режима требуется использовать два чипа, один из которых выполняет функции физического уровня и нижнего уровня MAC-протокола, а второй представляет собой внешний процессор (сторонней фирмы) для реализации верхнего уровня MAC-протокола. Для разработки базовых станций компания Fujitsu предоставляет отладочный комплект, реализующий полнодуплексный режим работы, с процессором Freescale MPC8560, но не поставляя программное обеспечение, обеспечивающее функции верхнего уровня MAC-протокола.

Компания PicoChip предлагает решение PC102/PC8520, построенное на двух своих параллельных процессорах PC102. Компания предоставляет программное обеспечение, реализующее физический уровень и функции нижнего уровня MAC-протокола на чипах PC102. Так же как и Fujitsu, компания PicoChip использует процессор Freescale MPC8565 для реализации верхнего уровня MAC-протокола в своем отладочном комплекте. Однако в отличие от Fujitsu, PicoChip лицензировала свое программное обеспечение для верхнего уровня MAC-протокола. Так как в решении PC102/PC8520 не заложены функции шифрования-дешифрования, для их выполнения должен быть использован внешний процессор.

Т а б л и ц а 2. Основные параметры решений для разработки абонентского оборудования WiMAX

	Fujitsu MB87M3400	Intel PRO/Wireless 5116	Sequans SQN1010	Wavesat DM256/MC336
Функции	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC нижнего уровня
Максимальная ширина канала	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Режим дуплекса	H-FDD, TDD, FDD (2 чипа)	H-FDD, TDD	FDD, H-FDD, TDD	FDD, H-FDD, TDD
Системный интерфейс	MII, 32-bit generic	MII	RMII, PCI	PCI
Поддержка функций шифрования-дешифрования	Есть	Есть	Есть	Нет

Т а б л и ц а 3. Основные параметры рассмотренных решений для разработки базовых станций WiMAX

	Fujitsu MB87M3400	PicoChip PC102/PC8520	Sequans SQN2010	Wavesat DM256/MC336
Функции	PHY/MAC	PHY/MAC нижнего уровня	PHY/MAC	PHY/MAC нижнего уровня
Максимальная ширина канала	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Количество чипов				
TDD:	1 чип	2 чипа	1 чип	1 чип
FDD:	2 чипа	2 чипа	1 чип	1 чип
Системный интерфейс	MII, 32-bit generic	2×16-bit generic	RMII, PCI	PCI
Радиоинтерфейс	Аналоговый и цифровой	Цифровой	Аналоговый и цифровой	Аналоговый и цифровой
Поддержка функций шифрования-дешифрования	Есть	Нет	Есть	Нет

Чип для разработки базовых станций SQN2010 компании Sequans является первой «системой на кристалле», имеющей полнодуплексный режим. SQN2010 реализует все функции физического и MAC уровней, необходимые для полнодуплексной работы базовой станции. Чип SQN2010 отличается от SQN1010 наличием второго центрального процессора, реализующего верхний уровень MAC-протокола. На чипе SQN1010 предусмотрен интерфейс PCI для обеспечения возможности подключения внешнего процессора.

Решение DM256/MC336 компании Wavesat может быть использовано для разработки базовых станций. Это решение поддерживает полнодуплексный режим работы, но следует отметить, что для реализации функций шифрования-дешифрования оно требует подключения внешнего процессора. Так же как и Fujitsu, Wavesat не предоставляет программное обеспечение для верхнего уровня MAC-протокола, необходимое для разработки базовых станций.

Из четырех описанных решений только чипы PicoChip PC102 не интегрируют в себе функций АЦП/ЦАП. Поэтому для разработок, в которых используется аналоговый радиointерфейс, дополнительно потребуются устройства АЦП/ЦАП. Основные параметры рассмотренных решений для разработки базовых станций представлены в табл. 3 [6]. Выбор производителя чипов для разработки систем WiMAX является важным стратегическим решением. Для быстрой и эффективной разработки системы требуется максимально полная программная и аппаратная поддержка и средства для разработки и отладки. Наличие отладочных комплектов позволяет значительно увеличить скорость и уменьшить стоимость разработки оборудования WiMAX, что является одним из главных критериев при выборе того или иного продукта.

Развертывание систем WiMAX

Построение сети фиксированного беспроводного доступа предполагает использование трех типов оборудования — базовых станций, абонентских станций и оборудования для организации связи между базовыми станциями. В сетях доступа на базе WiMAX найдут применение как узконаправленные антенны, так и антенны с более широким сектором охвата, вплоть до всенаправленных.

Топология сети

Для соединения «точка–точка» (рис. 6а) используются две направленные друг на друга антенны; так строятся, например, радиорелейные линии передач, в которых расстояние между соседними релейными вышками может исчисляться десятками километров. При топологии «точка–многоточка» (рис. 6б) в центре «ячейки» помещается базовая станция со всенаправленной или секторной антенной, а все обслуживаемые ей абоненты снабжаются сфокусированными на нее направленными антеннами.

Другой тип связи получится при использовании только всенаправленных антенн. В этом случае будет достигнута возможность соединения «каждого с каждым»,

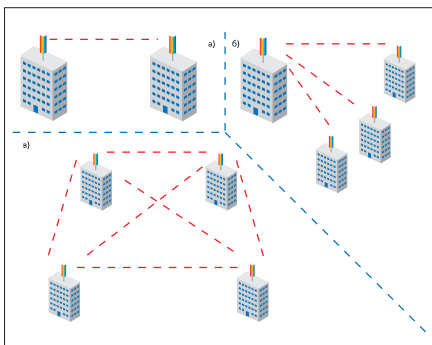


Рис. 6. Возможные топологии сети WiMAX

или «многоточка–многоточка» (mesh) (рис. 6в).

Базовая станция WiMAX представляет собой модульное решение, которое может по мере необходимости дополняться различными блоками, например, модулями для связи с магистральной сетью провайдера. В минимальной конфигурации устанавливается модуль радиointерфейса и модуль соединения с проводной сетью.

Диапазон частот

При выборе оборудования WiMAX кроме его технических характеристик и цены важное и зачастую определяющее значение представляет такой фактор, как специфические для России трудности оформления частотных разрешений. Дело в том, что в России практически не существует «безлицензионных» диапазонов. Для разных типов оборудования предусмотрен различный порядок получения частотных разрешений. Для работы в любых диапазонах операторы связи должны получить достаточно сложные и многоуровневые разрешения как частотных служб, так и служб надзора за связью [5].

Очевидно, что в нашей стране главным фактором, влияющим на скорость внедрения систем WiMAX, являются вопросы регулирования спектра, так как развитие рынка услуг WiMAX напрямую зависит от выделения операторам необходимого частотного ресурса. Сегодня наиболее перспективными с точки зрения будущего развития технологии WiMAX являются диапазоны в районе 2,4, 3,5 и 5,6 ГГц.

Следует учитывать, что распространение радиоволн в различных участках спектра имеет свои особенности, которые во многом определяют дальность действия оборудования, а также устойчивость к многолучевости.

Общие подходы к выбору системы WiMAX

Перед тем, как приступить к рассмотрению доступных систем WiMAX, необходимо проработать следующие системные вопросы [7]:

- Выбор диапазона частот.
- Определение величины необходимого частотного ресурса.
- Разработка процедур выделения и присвоения радиочастот.
- Проработка вопросов законодательства.
- Прежде чем переходить к рассмотрению конкретных систем, целесообразно рассмотреть общие вопросы выбора систем, что поможет на предварительном этапе анализа отбросить

явно неприемлемые варианты. Сформулируем критерии, которыми следует руководствоваться при выборе оборудования фиксированного беспроводного доступа WiMAX [7]:

- Оборудование должно производиться специализированной компанией, имеющей опыт разработки и производства беспроводного оборудования, что является некоторой гарантией качества.
- Технические характеристики оборудования, предоставляемые производителем, должны быть достаточно полными, для того чтобы по ним можно было сделать вывод о его возможностях. Представление таких характеристик говорит о профессионализме сотрудников и в определенной мере гарантирует, что речь идет об оригинальном продукте, а не о перепродаже малоизвестного бренда под торговой маркой продавца.
- Желательно, чтобы базовая станция имела возможность секторирования и поэтапного наращивания производительности, для чего она должна иметь возможность подключения внешней антенны. Тогда на первом этапе достаточно одной базовой станции с всенаправленной антенной, на следующем — двух, с антеннами с шириной диаграммы 180°, и так далее.
- Оборудование должно быть сертифицировано.
- Должна быть возможность получения разрешения на использование частот в диапазонах, используемых оборудованием.
- Система должна обладать приемлемой стоимостью, причем в первую очередь важна минимальная стоимость абонентского оборудования.

Заключение

Очевидно, что сегодня WiMAX является одной из самых передовых и перспективных технологий беспроводной передачи данных. При объединении усилий производителей оборудования и операторов связи WiMAX может стать реальной заменой DSL и кабельных соединений, предоставив абонентам необходимый сервис в крупных городах и на периферии. □

Литература

1. w ww. wimaxforum. org
2. Wide-band Orthogonal Frequency Division Multiplexing (W-OFDM), w ww. wi-lan. com
3. Марченко С. Источники уязвимостей в сетях беспроводной связи // АДЭ. 2004. № 13.
4. IEEE Std 802.16™-2004 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, w ww. ieee. org.
5. Власов В. А. Частотное регулирование и обеспечение информационной безопасности для оборудования Wi-Fi и WiMAX, //«Вестник связи». 2005. № 9.
6. Bob Wheeler. How to choose the best SoC for your WiMAX design // Wireless Net DesignLine. Oct 17, 2005.
7. Писарев Ю. Выбор системы фиксированного беспроводного доступа: попытка системного подхода // «Информационные телекоммуникационные сети» (Казахстан). 2003. № 4.