

Федеральное агентство связи

Московский технический университет связи и информатики

Кафедра АИТСС

Л.В. Юрасова, В.Б. Крейнделин

Учебное пособие

**Оборудование сетей абонентского радиодоступа семейства
стандартов IEEE 802.16**

Москва 2007

УДК: 621.391.037

Юрасова Л.В., Крейнделин В.Б. Оборудование сетей абонентского радиодоступа семейства стандартов IEEE 802.16: Учебное пособие / МТУСИ.-М., 2007.-39с.

В учебном пособии рассматриваются основные характеристики и особенности оборудования абонентского радиодоступа стандарта IEEE 802.16. Особое внимание уделено особенностям физического уровня радиointерфейса.

Ил. 5, список лит. 7 назв.

Рецензент: **Мамзев И.А.**, доктор технических наук, профессор

Издание утверждено на заседании факультета ИТ ХХ 2007 г.
Протокол №Х

© Московский технический университет
связи и информатики

Содержание.

Введение	4
1. История развития стандарта IEEE 802.16	4
2. Основные характеристики стандарта IEEE 802.16.....	7
3. Особенности стандарта IEEE 802.16	16
3.1. Подуровень конвергенции (Convergence Sublayer – CS)	16
3.2. MAC уровень.....	17
3.3. Уровень безопасности	17
3.4. Физический уровень	17
4. Беспроводной роуминг и решетчатая сетевая топология.	21
5. Режимы работы, предусмотренные в стандарте IEEE 802.16e.	22
6. Автоматический роуминг между сетями.	26
7. Гибкость и масштабируемость.	26
8. Преимущества стандартов IEEE 802.16 по сравнению с другими стандартами	27
9. Выводы.	29
Список литературы.	31

Введение

Беспроводные сети становятся одним из важнейших направлений развития телекоммуникаций. Их отличают гибкость архитектуры, возможность динамического изменения топологии, высокая скорость передачи данных, быстрота проектирования и развертывания, отсутствие необходимости дорогостоящей прокладки медного или волоконно-оптического кабеля.

Бурное развитие разнообразных мобильных телекоммуникаций и многообразие стандартов эфирного межсетевого обмена продиктовало разработку стандарта, решающего проблему совместимости оборудования связи различных производителей.

Стандарты семейства IEEE 802.16 предназначены для реализации широкополосных каналов последней мили в городских сетях. [1].

Наиболее активно продвижением стандартов IEEE 802.16 занимается в настоящее время WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) — некоммерческая организация, в создании которой приняли участие ведущие производители телекоммуникационного оборудования (Airspan Networks, Alvarion Ltd, Aperto Networks, Fujitsu Microelectronics America, Intel, Proxim Corporation и др.).

1. История развития стандарта IEEE 802.16

Стандарт IEEE 802.16 разрабатывается Институте инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) в координации с Европейским институтом стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI).

Развитие стандарта IEEE 802.16 началось в 2001 году. В декабре 2001 года была принята первая версия стандарта IEEE 802.16-2001, который изначально предусматривал рабочий диапазон частот 10-66 ГГц.

Данный стандарт описывал организацию широкополосной беспроводной связи с топологией «точка—многоточие» и был ориентирован на создание стационарных беспроводных сетей масштаба мегаполиса (metropolitan area network, MAN). Именно поэтому данный стандарт называли также WirelessMAN. На физическом уровне стандарт IEEE 802.16-2001 предполагал использование всего одной несущей частоты (Single-Carrier, SC), поэтому в название протокола стали добавлять SC, то есть WirelessMAN-SC.

Организация связи в частотном диапазоне 10-66 ГГц из-за наличия сильного затухания коротких длин волн возможна преимущественно в зоне прямой видимости между передатчиком и приемником сигнала. В этом заключалась одна из особенностей протокола WirelessMAN-SC. В то же время использование такого частотного диапазона (то есть требование именно прямой видимости приемника и передатчика и невозможность работы на отраженных лучах) позволяло избежать одной из главных проблем радиосвязи — многолучевого распространения сигнала. Ширина полосы частот каналов связи, которые могут быть использованы в этом частотном диапазоне, является довольно большой (типичное значение — 25 или 28 МГц), что позволяет достигать высоких (порядка 120 Мбит/с) скоростей передачи.

Необходимость построения беспроводной сети в зоне прямой видимости привела к тому, что устройства стандарта IEEE 802.16 так и не получили широкого распространения. Поэтому несколько позднее, в январе 2003 года, было принято расширение стандарта IEEE 802.16 под названием IEEE 802.16a-2003, которое предусматривало использование частотного диапазона от 2 до 11 ГГц. Данный стандарт также был ориентирован на создание стационарных беспроводных сетей масштаба мегаполиса. Предполагалось, что он станет альтернативой традиционным решениям широкополосного доступа для последней и мили — кабельным модемам, xDSL и каналам T1/E1. Кроме того, сети стандарта IEEE 802.16a

планировались для использования в качестве дополнительной технологии для подсоединения точек доступа стандартов 802.11a/b/g к Интернету.

Основным отличием стандарта IEEE 802.16a от базового стандарта 802.16 было применение иного частотного диапазона, который не требует прямой видимости между приемником и передатчиком. Зона покрытия таких беспроводных сетей значительно шире, чем сетей стандарта IEEE 802.16. Следует отметить, что использование частотного диапазона 2-11 ГГц потребовало и принципиального пересмотра техники кодирования и модуляции сигнала на физическом уровне.

Логическим продолжением стандарта IEEE 802.16a стал стандарт IEEE 802.16d, который предусматривал возможность реализации фиксированного доступа внутри помещений.

Окончательно стандарт IEEE 802.16d был принят в июле 2004 года и получил название IEEE 802.16-2004. При этом данный стандарт охватывал предыдущие версии IEEE 802.16d и IEEE 802.16a.

В декабре 2005 года был принят стандарт IEEE 802.16e, который предусматривает возможность обслуживания мобильных абонентов, а также обеспечивает роуминг между сетями различных «беспроводных» стандартов, чтобы абонент без ущерба для сеанса связи мог переходить из беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11a/b/g в сети IEEE 802.16 и обратно.

Решение вопросов роуминга представляется весьма важным для дальнейшего продвижения беспроводных технологий. Сегодня абоненты сетей стандарта IEEE 802.11a/b/g могут пользоваться услугами беспроводного доступа только находясь на территории зоны доступа. Покидая такую зону, они теряют возможность соединения. С помощью технологии IEEE 802.16e абоненты получают возможность оптимального соединения: посредством IEEE 802.11 a/b/g — находясь в пределах соответствующей зоны доступа, посредством IEEE 802.16 — находясь в зоне действия «городской» сети WMAN [2].

2. Основные характеристики стандарта IEEE 802.16

Одной из особенностей стандарта IEEE 802.16a/d является возможность работы в условиях не прямой видимости. Это достигается за счет использования технологии ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), которая позволяет эффективно бороться с таким негативным явлением, как многолучевая интерференция сигналов. Эффект многолучевой интерференции сигналов заключается в том, что в результате многократных отражений сигнала от естественных преград один и тот же сигнал может попадать в приемник различными путями. Но эти пути распространения имеют и разные длины, а потому для различных путей распространения ослабление сигнала будет неодинаковым. Следовательно, в точке приема результирующий сигнал представляет собой суперпозицию (интерференцию) многих сигналов, имеющих различные амплитуды и смещенных относительно друг друга по времени, что эквивалентно сложению сигналов с разными фазами.

Следствием многолучевого распространения является искажение формы принимаемого сигнала. Многолучевая интерференция присуща любому типу сигналов, но особенно негативно она сказывается на широкополосных сигналах. Дело в том, что при использовании широкополосного сигнала в результате интерференции определенные частоты складываются синфазно, что приводит к увеличению сигнала, а некоторые, наоборот, противофазно, вызывая ослабление сигнала на данной частоте.

Говоря о многолучевой интерференции, возникающей при передаче сигналов, различают два крайних случая. В первом из них максимальная задержка между различными сигналами не превышает времени длительности одного символа и интерференция возникает в пределах одного передаваемого символа. Во втором случае максимальная задержка между различными

сигналами больше длительности одного символа, а в результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные символы, и возникает так называемая межсимвольная интерференция (InterSymbol Interference, ISI).

Наиболее существенно на искажение сигнала влияет межсимвольная интерференция. Поскольку символ — это дискретное состояние сигнала, характеризующееся значениями частоты несущей, амплитуды и фазы, то для различных символов меняются амплитуда и фаза сигнала, а значит, восстановить исходный сигнал крайне сложно. Чтобы хотя бы частично компенсировать эффект многолучевого распространения, используются частотные эквалайзеры, однако по мере роста скорости передачи данных либо вследствие увеличения символьной скорости, либо из-за усложнения схемы кодирования эффективность использования эквалайзеров падает.

В результате при более высоких скоростях передачи применяется метод кодирования данных, который состоит в том, что поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов и передача ведется параллельно на всех этих подканалах. При этом высокая скорость передачи достигается именно за счет одновременной передачи данных по всем каналам, а скорость передачи в отдельном подканале вполне может быть невысокой. Поскольку в каждом из частотных подканалов скорость передачи данных можно сделать не слишком высокой, это создает предпосылки для эффективного подавления межсимвольной интерференции.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала в пределах отдельного канала, а с другой — достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, желательно как можно более плотно расположить частотные

подканалы, но при этом избежать межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независимость каналов друг от друга. Частотные каналы, удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются ортогональными. Несущие сигналы всех частотных подканалов (а точнее, функции, описывающие эти сигналы) ортогональны друг другу. Важно, что хотя сами частотные подканалы могут частично перекрывать друг друга, ортогональность несущих сигналов гарантирует частотную независимость каналов друг от друга, а следовательно, и отсутствие межканальной интерференции (рис. 1).

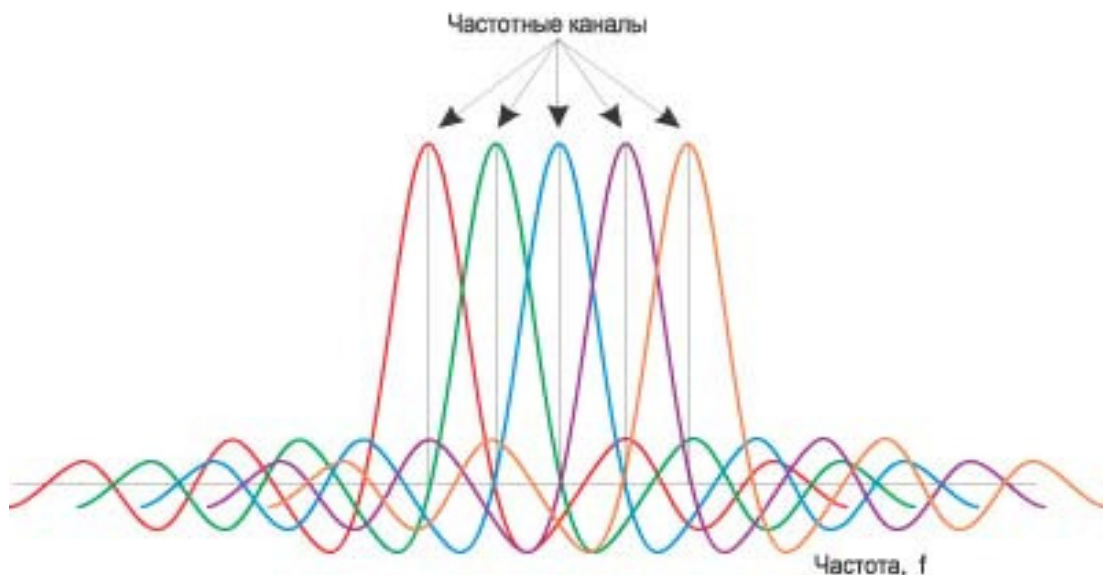


Рис. 1. Пример перекрывающихся частотных каналов с ортогональными несущими.

Рассмотренный способ деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы называется ортогональным частотным разделением с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)). Для его реализации в передающих устройствах используется обратное быстрое преобразование Фурье (Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)), переводящее предварительно мультиплексированный на n -каналов сигнал из временного представления в частотное (рис. 2).

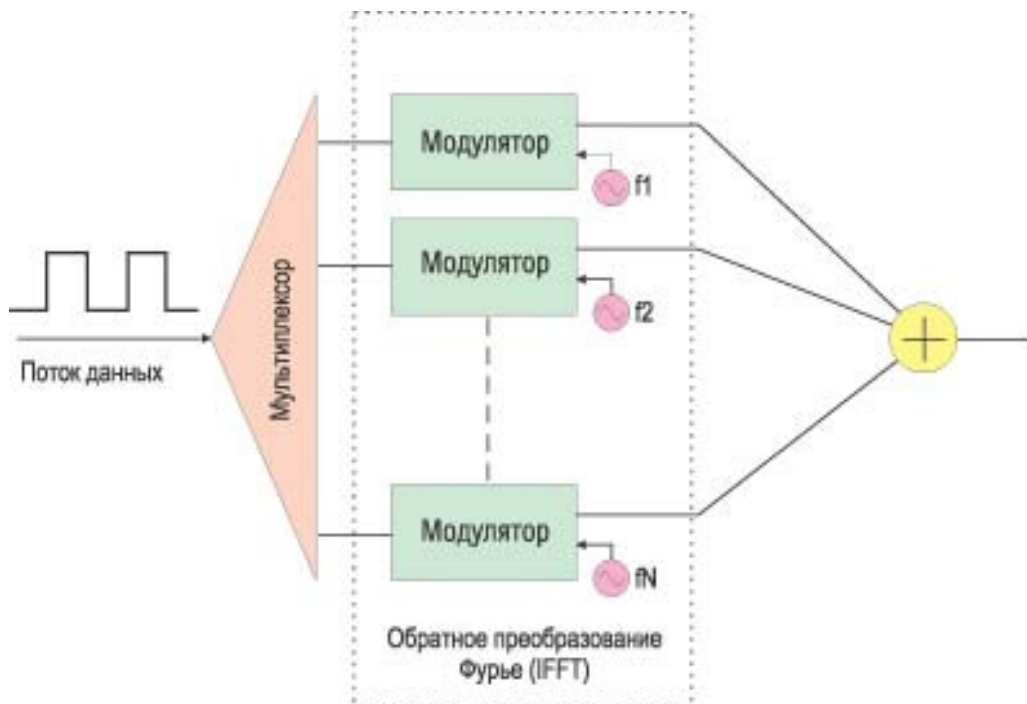


Рис. 2. Реализация метода OFDM.

Каждый отсчет IFFT представляет собой поднесущую, которая подвергается фазовой (BPSK, QPSK) или квадратурно-амплитудной (QAM16 или QAM64) модуляции, что позволяет повысить информационную скорость передачи данных. Группа поднесущих частот, которая в данный момент переносит битовые потоки, называется символом OFDM.

Технология OFDM находит применение не только в протоколе IEEE 802.16. К примеру, в протоколе IEEE 802.11g также используется технология OFDM, однако, в сравнении с протоколом IEEE 802.11g, в протоколе IEEE 802.16 предусмотрено более гибкое распределение полосы частот, используемых для передач данных. Причем это можно сделать как за счет уменьшения количества поднесущих, так и с помощью их сужения. Минимальная ширина сигнала, предусмотренная стандартом, составляет 1,25 МГц, а максимальная — 20 МГц. Естественно, что с уменьшением частотного ресурса скорость передачи уменьшается, но сама эта возможность позволяет использовать частотный спектр отдельными фрагментами, а не целиком, как это реализовано в протоколе IEEE 802.11g.

Для повышения помехоустойчивости при передаче данных в протоколе IEEE 802.16 предусмотрены такие традиционные технологии, как сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби и коды Рида-Соломона. Кроме того, в стандарте IEEE 802.16e-2005 предусмотрено использование таких современных методов кодирования, как турбокодирование [3].

В итоге в стандартах IEEE 802.16 были выделены три типа физического уровня соединений, различающихся методом модуляции сигнала:

- WirelessMAN-SC — физический уровень с одной несущей частотой;
- WirelessMAN-OFDM — ортогональное частотное разделение на 256 каналов с мультиплексированием. Реализация множественного доступа к среде передачи данных происходит за счет технологии временного разделения (Time Division Multiple Access, TDMA);
- WirelessMAN-OFDMA — ортогональное масштабируемое частотное разделение каналов с мультиплексированием. Используется разделение на 2048 поднесущие частоты. Коллективный доступ к среде передачи данных реализуется за счет объединения нескольких поднесущих частот в один канал передачи и его выделения конкретному получателю (OFD Multiple Access, OFDMA).

Основные характеристики стандартов, входящих в семейство IEEE 802.16, приведены в Табл.1.

Таблица 1. Краткие характеристики стандартов, входящих в семейство IEEE 802.16.

Название стандарта	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16e
Частотный диапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц

Скорость передачи информации	32-135 Мбит/с	до 75 Мбит/с	до 15 Мбит/с
Модуляция	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ширина полосы частот	20, 25 и 28 МГц	Регулируемая 1,5-20МГц	Регулируемая 1,5-20МГц
Радиус действия	2-5 км	7-10 км макс. радиус 50 км	2-5 км
Условия работы	Прямая видимость	Работа на отраженных лучах	Работа на отраженных лучах

Физический уровень WirelessMAN-SC предназначен для применения в зоне прямой видимости приемника и получателя сигналов. Остальные два уровня, основанные на ортогональном частотном разделении каналов, могут использоваться для построения сетей по топологии «точка-многоточие» в условиях отсутствия прямой видимости.

Из двух OFDM-уровней уровень WirelessMAN-OFDM несколько проще для реализации с технической точки зрения и поэтому шире используется на практике.

В случае ортогонального частотного разделения на 256 каналов с мультиплексированием (WirelessMAN-OFDM) используется 256 отсчетов IFFT, из которых 192 поднесущие являются информационными, то есть применяются для передачи данных, 8 поднесущих предназначены для измерения характеристик канала связи и используются для передачи

пилотных символов (pilot symbols), а остальные 56 поднесущих частот могут применяться для организации защитных интервалов, длительность которых составляет 1/4, 1/8, 1/16 или 1/32 длительности OFDM-сигнала. Ширина канала связи может быть различной и изменяется от 1,25 до 20 МГц. Ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием типа WirelessMAN-OFDMA представляет собой масштабируемое частотное разделение каналов, то есть количество поднесущих в данном случае не фиксировано и может составлять 512, 1024 и 2048. В зависимости от количества поднесущих меняется и ширина канала, и количество подканалов (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики OFDMA.

Ширина канала	5 МГц	10 МГц	20 МГц
Количество поднесущих	512	1024	2048
Количество подканалов	32	64	128
Ширина подканала	156 кГц		
Длительность символа	101 мкс		
Расстояние между поднесущими	11,2 кГц		
Длительность циклического префикса	11,2 мкс		

Одной из особенностей стандартов IEEE 802.16 является их гибкая адаптация к внешним помехам. Система подстраивается к характеристикам канала в каждый момент времени. Например, в идеальном по энергетике канале все поднесущие OFDM будут работать с модуляцией QAM64 и скоростью сверточного кодирования 3/4, обеспечивая максимальную скорость передачи 74,81 Мбит/с. В наихудших условиях передачи используются QPSK-модуляция для всех поднесущих и сверточное кодирование со скоростью 1/2. При этом скорость передачи составляет 1,04 Мбит/с. Всего протоколом предусмотрено семь различных комбинаций типов модуляции и скорости сверточного кодирования, в результате чего достигается требуемая помехоустойчивость протокола и большое разнообразие возможных скоростей передачи (табл. 3 и 4).

Таблица 3. Возможные режимы передачи.

Тип модуляции	Скорость сверточного кодирования	Количество информационных бит на символ	Количество информационных бит в OFDM-символе
BPSK	1/2	0,5	88
QPSK	1/2	1	184
QPSK	3/4	1,5	280
QAM16	1/2	2	376
QAM16	3/4	3	568
QAM64	2/3	4	760
QAM64	3/4	4,5	856

Таблица 4. Зависимость скорости передачи от ширины канала связи и типа модуляции.

Модуляция	QPSK	QPSK	QAM16	QAM16	QAM64	QAM64
Скорость сверточного кодирования	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
1,75 МГц	1,04	2,18	2,91	4,36	5,94	6,55
3,5 МГц	2,08	4,37	5,82	8,73	11,88	13,09
7,0 МГц	4,15	8,73	11,64	17,45	23,75	26,18
10 МГц	8,31	12,47	16,63	24,94	33,25	37,40
20 МГц	16,62	24,94	33,25	49,87	66,49	74,81

Существенным отличием стандартов IEEE 802.16 от 802.11 является возможность использования протокола с разрешением конфликтов. Устройства стандартов IEEE 802.16 работают по принципам Ethernet: все они имеют равные права на доступ к радиотракту, а попытавшись одновременно установить связь, разрешают конфликты, повторяя попытки захвата среды через случайное время. В сетях стандартов IEEE 802.16 имеется выделенное устройство — базовая станция оператора, которая раздает своим подчиненным права доступа к радиосреде. В результате имеется возможность более эффективно использовать радиочастотный ресурс и обеспечить эффективную передачу данных.

Базовые станции (Base Station, BS), как правило, применяют мультиплексирование с разделением по времени (TDM), при котором каждой абонентской станции (Subscriber Station, SS) последовательно выделяются

временные слоты. Абоненты же разделяют общий канал посредством схемы множественного доступа с разделением по времени (Time Division Multiple Access, TDMA).

Для реализации дуплексного режима обмена данными используются две технологии: дуплексный режим с разделением по времени (TDD) нисходящего (DownLink) и восходящего (UpLink) потоков (при этом задействуется общий канал связи) и дуплексный режим с разделением по частотам (FDD), когда нисходящий и восходящий потоки оперируют на разных каналах и обмен данными может выполняться одновременно.

Стандарт IEEE 802.16e предназначен для мобильных систем. Безопасность в сети обеспечивается на уровне протокола 3-DES.

Подуровень конвергенции (CS) размещается поверх уровня MAC. Этот подуровень выполняет следующие функции:

- воспринимает данные от вышерасположенного уровня;
- осуществляет классификацию этих данных;
- выполняет (если требуется) обработку данных на основе этой классификации;
- транспортирует блоки данных уровня конвергенции соответствующему сервису MAC;
- получает блоки данных от уровня конвергенции партнеров.

Канал от базовой станции (BS) до абонента работает по схеме точка-многоточка. При этом используется антенна, позволяющая осуществлять связь с несколькими клиентами одновременно. В этом режиме BS выполняет простую функцию ретранслятора. В ее задачи при заданной частоте может входить только распределение времени между восходящим и нисходящим каналами.

3. Особенности стандарта IEEE 802.16

С самого начала стандарт IEEE 802.16 задумывался таким образом, чтобы развиваться как набор радиointерфейсов, базирующихся на общем протоколе управления доступом к среде передачи данных (Medium Access Control, MAC), но с различными спецификациями физического уровня, зависящими от используемой части спектра. MAC-уровень протокола разрабатывался для сетей доступа с топологией «точка—многоточка» (point-to-multipoint) с целью достижения высокой скорости передачи сигналов как в восходящем Up Link-потоке (поток от абонента к базовой станции), так и в нисходящем Down Link-потоке (поток от базовой станции к абоненту).

По структуре сети стандарта IEEE 802.16 очень похожи на традиционные сети мобильной связи: здесь также имеются базовые станции, которые действуют в радиусе до 50 км. Для соединения базовой станции с абонентом необходимо устанавливаемое в помещении абонентское оборудование. С этого блока сигнал поступает по стандартному Ethernet-кабелю либо непосредственно на конкретный компьютер, либо на точку доступа стандарта IEEE 802.11, либо в локальную проводную сеть стандарта Ethernet.

Одна базовая станция в сети стандарта IEEE 802.16 может обслуживать большое количество абонентов и предоставлять им услуги различного уровня. Например, один сектор одной базовой станции способен обеспечить скорость передачи данных, достаточную для одновременного обслуживания более 60 предприятий, подключенных по каналам типа T1 (передача данных со скоростью до 2 Мбит/с), и 100 жилых домов, подключенных по каналам типа DSL. Типовая базовая станция имеет до шести секторов.

3.1. Подуровень конвергенции (Convergence Sublayer – CS)

Подуровень конвергенции (Convergence Sublayer – CS) расположен над MAC уровнем и предназначен для организации взаимодействия между более высокими уровнями сети и MAC уровнем. В стандарте предусмотрены два

уровня конвергенции: АТМ и пакетный. Первый обеспечивает взаимодействие МАС уровня IEEE 802.16 и АТМ протокола, второй – взаимодействие с пакетными протоколами.

3.2. МАС уровень

Протокол МАС уровня описывает порядок взаимодействия между МАС уровнем и подуровнем CS.

В протоколе МАС уровня предусмотрена поддержка дуплекса (частотного или временного), синхронизации, разрешение коллизий, возможных на этапе установления соединения.

3.3. Уровень безопасности

Уровень безопасности – алгоритмы шифрования на участке между базовой и абонентскими станциями. Уровень безопасности включает два положения:

- Протокол инкапсуляции для шифрования пакетов, включающий несколько вариантов пар шифрование-аутентификация и правила их применения к пакетам МАС уровня.

- Протокол управления ключами шифрования РКМ (Privacy Key Management), обеспечивающий распределение ключей от базовой станции абонентам.[6].

3.4. Физический уровень

Физический уровень - методы организации дуплекса, способы адаптации, методы множественного доступа и модуляции.

Предусмотрены режимы временного и частотного дуплекса. Вид модуляции и кодирования могут изменяться адаптивно от пакета к пакету индивидуально для каждого абонента, что позволяет увеличить реальную пропускную способность примерно вдвое по сравнению с неадаптивными системами.

Передача от абонентских станций к базовой станции строится на комбинации двух методов многостанционного доступа: DAMA – доступ по

запросу и TDMA – доступ с временным разделением. Структура пакетов физического уровня поддерживает переменную длину пакета MAC уровня. Передатчик осуществляет рандомизацию, помехоустойчивое кодирование и модуляцию QPSK, 16QAM и 64QAM.

Стандарт покрывает диапазон частот от 2 до 11 ГГц. Стабильность частоты должна лежать в пределах $\pm 10^{-6}$. Базовая станция **BS**, размещается в здании или на вышке и осуществляет связь со станциями клиентов (**SS** - Subscriber Station) по схеме точка-мультиточка (**PMP**). Возможен сеточный режим связи (**Mesh** - сетка связей точка-точка - **PTP**), когда любые клиенты (**SS**) могут осуществлять связь между собой непосредственно, а антенные системы, как правило, являются всенаправленными. Базовая станция предоставляет соединение с основной сетью и радиоканалы к другим станциям. Диапазон рабочих расстояний может достигать 48 километров (в случае прямой видимости) при типовом радиусе сети 6-8 километров (для режима Mesh при высоте размещения антенны BS - 50м), также режим мультиточка-мультиточка (**MP-MP**), который имеет ту же функциональность, что и PMP. Клиентская станция (**SS**) может быть радио терминалом или повторителем (более типично) для организации локального трафика. Трафик может проходить через несколько повторителей, прежде чем достигнет клиента. Антенны в этом случае являются направленными с возможностью дистанционной настройки, где пропускная способность может быть гарантированной. Терминальная станция клиента (**SS**) обычно имеет остронаправленную антенну. По этой причине положение антенны должно быть жестко фиксировано и устойчиво к ветру и другим потенциальным источникам вибрации. Широкополосные системы доступа к радио сети помимо BS и SS содержат клиентское терминальное оборудование (**TE**), оборудование основной сети, межузловые каналы и повторители (**RS**). Повторители используются часто тогда, когда между конечными точками канала нет прямой видимости. Повторитель передает сигнал от BS к одной или нескольким SS. В системах MP-MP большинство станция являются

повторителями. **PTP**-соединения (точка-точка) между базовыми станциями могут поддерживать обмен согласно стандартам от **DS-3** до **OC-3**.

Канал связи предполагает наличие двух практически независимых направлений обмена: отправитель-получатель (**uplink** - восходящий канал) и получатель-отправитель (**downlink** - нисходящий канал; по аналогии со спутниковыми каналами). Эти два субканала используют разные неперекрывающиеся частотные диапазоны. Данный стандарт относится к уровню L2, хотя его взаимосвязь с физическим уровнем (**PHY**) достаточно тесная.

При формировании радиосетей определенную проблему составляет интерференция сигналов смежных каналов и наложении перекрестных наводок с тепловыми шумами. Для таких каналов отношение **I/N** (отношение сигнала интерференции к тепловому шуму) лежит в диапазоне $-6 \div -10$ дБ. Следует, разумеется, учитывать, что уровень интерференционного сигнала варьируется в очень широких пределах.

Радиоволны в диапазоне 10-66 ГГц распространяются прямолинейно и подвержены поглощению при наличии дождя или сильного снега. Любые строения или объекты ландшафта препятствуют их распространению, даже если перекрывают видимость между передающей и принимающей антеннами частично. Рекомендуются вертикальная или горизонтальная ориентации поляризации. Для успешной работы канала нужно обеспечить достаточно большое отношение уровней несущей и интерференционного сигнала (**C/I**). На практике приходится учитывать отношение **C/(I+N)**, где **N** - уровень теплового шума, а также уровень шумов приемника (~6дБ). Тепловой шум приемника может иметь уровень -138 дБВт/МГц. Уровень интерференционного сигнала может быть примерно тем же. Эти факторы определяют выбор типа антенны, мощность передатчика и предельную длину канала. Чрезмерное увеличение мощности передатчика (с целью улучшения отношения сигнал-шум) не желательно, так как это приводит к возрастанию уровня интерференционного сигнала.

Типовыми рекомендуемыми значениями параметров BS являются:

Мощность передатчика	+24 дБм
Коэффициент усиления антенны SS	+34 dBi
Коэффициент усиления антенны	+19 dBi
BS	
Полоса несущей	28 МГц

Для SS рекомендуется верхнее значение спектральной плотности < +30дБВт/МГц, аналогичные требования справедливы и для повторителей (RS).

Будем считать, что типовое значение шума приемника равно 6 дБ, тогда спектральная мощность теплового шума приемника вычисляется по формуле:

$$N_o = 10\log(kT_o) + N_F$$

$$N_o = -144+6=-138 \text{ дБВт/МГц, где}$$

N_o - спектральная мощность теплового шума приемника (дБВт/МГц)

kT_o - закон равномерного распределения (-144дБВт/МГц)

N_F - значение шума приемника (дБ).

Если рабочая частота равна 28 ГГц ($\lambda = 0,011\text{м}$), а значение усиления антенны равно 20 дБи, тогда приемлемый уровень помех определяется как:

$$P_{\text{sdBS}} = -144 - 10\log(0.011^2) - 20 + 10 \text{ Log}(4\lambda) = -114 \text{ (дБВт/м}^2\text{)МГц.}$$

Заметим, что в данном анализе рассматривалась только базовая станция (составляющая SS не учитывалась). Это в первую очередь связано с тем, что BS обычно размещаются на высоких зданиях и имеют всенаправленные антенны, что увеличивает вероятность обеспечения прямой видимости. С другой стороны SS чаще размещаются на небольших высотах, что уменьшает вероятность гарантированной прямой видимости.

Стандартный полнодуплексный канал базовой станции может иметь пропускную способность 75 Мбит/с. Такой канал обеспечивает до 60 соединений T1 и сотни связей с домами, использующими DSL-подключения (при полосе 20 МГц). В последнем случае предоставляется качество обслуживания (QoS) на уровне “наилучшего возможного”. При этом

предоставляется минимальные задержки, что важно при передаче голоса (например, в режиме VoIP). Схема взаимодействия радиосетей в случае использования стандарта IEEE 802.16 показана на рис. 3.

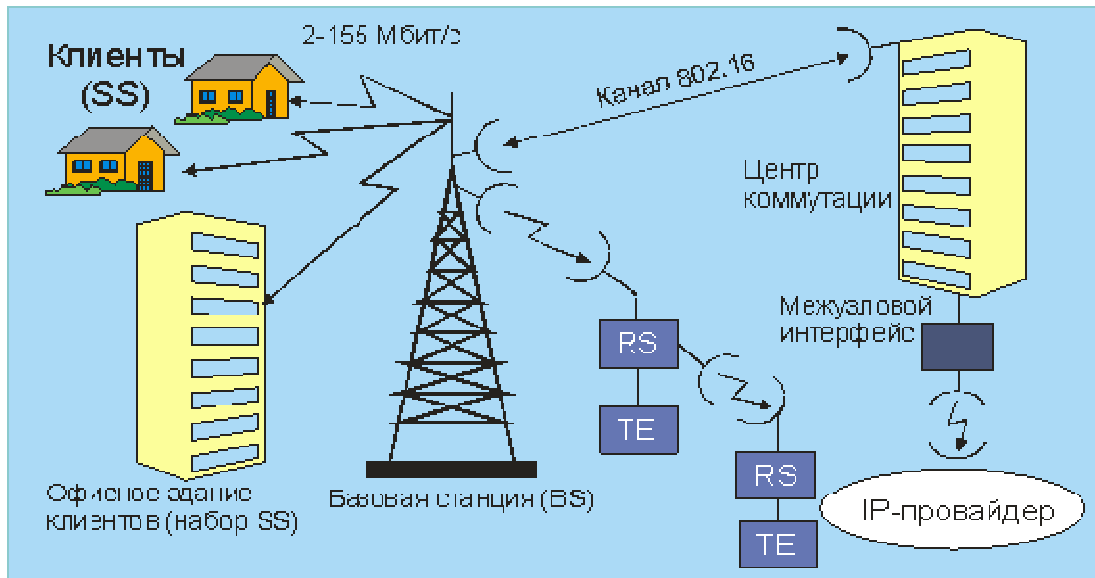


Рис. 3. Место стандарта IEEE 802.16 в сети связи общего пользования

Стандарт IEEE 802.16 может решать задачи, которые возникают в каналах с асимметричным трафиком. Сейчас они часто решаются клиентами и сервис-провайдерами путем заказа выделенных линий. Внедрение нового стандарта позволит отказаться от выделенных каналов, обходясь во многих случаях исключительно беспроводными средствами.

4. Беспроводной роуминг и решетчатая сетевая топология.

Исходный стандарт IEEE 802.16 предполагает работу в диапазоне частот от 10 ГГц до 66 ГГц и требует, чтобы мачты находились друг от друга в зоне прямой видимости. Расширение IEEE 802.16a, утвержденное в январе 2003 г., предполагает работу оборудования в более низком диапазоне частот – от 2 ГГц до 11 ГГц – и позволяет устанавливать соединения и без наличия прямой видимости. Для беспроводного широкополосного доступа это является серьезным шагом вперед – ведь больше нет необходимости в том, чтобы с места, в котором установлен передатчик, обязательно было видно принимающую антенну. С появлением IEEE 802.16a операторы получили

возможность подключать к одной мачте большее количество абонентов и значительно сократить расходы на обслуживание.

Рабочая группа по последней версии стандарта – IEEE 802.16e – в целях повышения коммерческой ценности этой возможности разрабатывает технические нормативы, которые позволят использовать оборудование стандарта IEEE 802.16 в мобильных клиентских системах. Эти клиентские системы смогут без разрыва соединения перемещаться из зоны обслуживания одной базовой станции в зону обслуживания другой, что сделает возможным роуминг между разными территориями обслуживания.

5. Режимы работы, предусмотренные в стандарте IEEE 802.16e.

Стандарт IEEE 802.16e-2005 включил в себя все ранее выходившие версии и на данный момент предоставляет следующие режимы.

- **Fixed WiMAX** - фиксированный доступ;
- **Nomadic WiMAX** - сеансовый доступ;
- **Portable WiMAX** - доступ в режиме перемещения;
- **Mobile WiMAX** - мобильный доступ.

Fixed WiMAX. Фиксированный доступ представляет собой альтернативу широкополосным проводным технологиям (xDSL, T1, т.п.). Стандарт использует диапазон частот 10-66 ГГц. Этот частотный диапазон из-за сильного затухания коротких волн требует прямой видимости между передатчиком и приёмником сигнала. С другой стороны, данный частотный диапазон позволяет избежать одной из главных проблем радиосвязи - многолучевого распространения сигнала. При этом ширина каналов связи в этом частотном диапазоне довольно велика (типичное значение - 25 или 28 МГц), что позволяет достигать скоростей передачи до 120 Мбит/с. Фиксированный режим включался в версию стандарта IEEE 802.16d-2004 и уже используется в ряде стран. Однако большинство компаний,

предлагающих услуги Fixed WiMAX, ожидают скорого перехода на портативный и в дальнейшем мобильный WiMAX.



Рис. 4. Фиксированный доступ.

Nomadic WiMAX. Сеансовый (кочующий) доступ добавил понятие сессий к уже существующему Fixed WiMAX. Наличие сессий позволяет свободно перемещать клиентское оборудование между сессиями и восстанавливать соединение уже с помощью других вышек WiMAX, нежели тех, что были использованы во время предыдущей сессии. Такой режим разработан в основном для портативных устройств, таких, как ноутбуки, КПК. Введение сессий позволяет также уменьшить расход энергии клиентского устройства, что тоже немаловажно для портативных устройств.

Portable WiMAX. Для режима Portable WiMAX добавлена возможность автоматического переключения клиента от одной базовой станции WiMAX к другой без потери соединения. Однако для данного режима всё ещё ограничена скорость передвижения клиентского оборудования - 40 км/ч. Впрочем, уже в таком виде можно использовать клиентские устройства в дороге (в автомобиле при движении по жилым районам города, где скорость ограничена, на велосипеде, двигаясь пешком, т.д.). Введение данного режима сделало целесообразным использование технологии WiMAX для смартфонов и карманных персональных компьютеров. В 2006 году начат выпуск

устройств, работающих в портативном режиме WiMAX. Считается, что до 2008 года внедрение и продвижение на рынок именно этого режима будет приоритетным.

Mobile WiMAX был разработан в стандарте IEEE 802.16e-2005 и позволил увеличить скорость перемещения клиентского оборудования до более 120 км/ч.

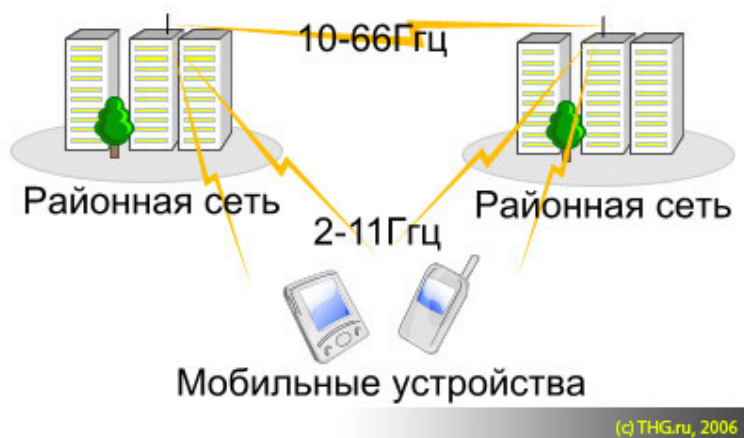


Рис. 5. Мобильный доступ.

Основными достижениями мобильного режима можно считать нижеприведённые факторы.

1. Устойчивость к многолучевому распространению сигнала и собственным помехам.
2. Масштабируемая пропускная способность канала.
3. Технология Time Division Duplex (TDD), которая позволяет эффективно обрабатывать асимметричный трафик и упрощает управление сложными системами антенн за счёт эстафетной передачи сессии между каналами.
4. Технология Hybrid-Automatic Repeat Request (H-ARQ), которая позволяет сохранять устойчивое соединение при резкой смене направления движения клиентского оборудования.

5. Распределение выделяемых частот и использование субканалов при высокой загрузке позволяет оптимизировать передачу данных с учётом силы сигнала клиентского оборудования.
6. Управление энергосбережением позволяет оптимизировать затраты энергии на поддержание связи портативных устройств в режиме ожидания или простоя.
7. Технология Network-Optimized Hard Handoff (ННО), которая позволяет до 50 миллисекунд и менее сократить время на переключение клиента между каналами.
8. Технология Multicast and Broadcast Service (MBS), которая объединяет функции DVB-H, MediaFLO и 3GPP E-UTRA для:
 - достижения высокой скорости передачи данных с использованием одночастотной сети;
 - гибкого распределения радиочастот;
 - низкого потребления энергии портативными устройствами;
 - быстрого переключения между каналами.
9. Технология Smart Antenna, поддерживающая субканалы и эстафетную передачу сессии между каналами, что позволяет использовать сложные системы антенн, включая формирование диаграммы направленности, пространственно-временное маркирование, пространственное мультиплексирование (уплотнение).
10. Технология Fractional Frequency Reuse, которая позволяет контролировать наложение/пересечение каналов для повторного задействования частот с минимальными потерями.
11. Размер фрейма в 5 миллисекунд создает оптимальный компромисс между надёжностью передачи данных за счёт использования малых пакетов и накладными расходами за счёт увеличения числа пакетов (и как следствие, заголовков).

6. Автоматический роуминг между сетями.

Весьма важным является разработка процедуры, позволяющей мобильным устройствам переключаться с одной базовой станции на другую, из одной сети типа IEEE 802 в другую (например, из сети стандарта IEEE IEEE 802.11b в сеть стандарта IEEE 802.16) и даже из проводной сети в сеть на основе IEEE 802.11 или IEEE 802.16. Задача состоит в том, чтобы стандартизировать переключение, чтобы устройства по мере перемещения из сети одного типа в сеть другого типа могли работать совместно.

Сегодня пользователи сетей стандарта IEEE 802.11 могут передвигаться вокруг здания или точки доступа и оставаться при этом на связи, но стоит им отойти подальше, и соединение будет разорвано. С оборудованием стандарта IEEE 802.16e пользователи смогут оставаться подключенными постоянно – по технологии IEEE 802.11, находясь в зоне покрытия точки доступа, а затем по технологии IEEE 802.16, выйдя из этой зоны и переключившись на сеть на основе WiMAX.

В будущем наличие поддержки стандарта IEEE 802.16e (встроенной или реализуемой добавлением отдельной карты) в карманном ПК или в ноутбуке даст возможность пользователям оставаться на связи, перемещаясь по всему городу. Например, установленный в базу ноутбук сможет подключаться по технологии Ethernet или IEEE 802.11, а когда пользователь будет передвигаться по городу и его окрестностям, подключение будет осуществляться по стандарту IEEE 802.16.

7. Гибкость и масштабируемость.

Стандарт IEEE 802.16 сможет, помимо прочего, предоставить важные преимущества в плане гибкости предприятиям, деятельность которых связана с частыми перемещениями, например строительным компаниям, имеющим офисы на каждом строящемся объекте. Не дожидаясь неделями

прокладки линии T1 или DSL, на новых и временных объектах можно будет быстро и просто организовывать беспроводной широкополосный доступ.

Кроме того, стандарт IEEE 802.16 открывает широкие возможности масштабирования. Представьте себе несколько сотен пользователей точек доступа на пятидневной конференции, пытающихся получить доступ в сеть. Доступ в локальную сеть не будет проблемой, поскольку в ее рамках стандарт IEEE 802.11 обеспечивает достаточно высокую пропускную способность каналов. Но что будет, если эти пользователи одновременно пожелают войти в Интернет или подключиться к своим корпоративным сетям по технологии VPN? У гостиницы может быть один канал T1, обслуживающий "обычные" широкополосные подключения ее постояльцев; однако на такие дни пропускную способность нужно будет значительно увеличивать. С беспроводным широкополосным доступом легко организовать обслуживание в отдельно взятом месте на короткий период времени – такого поставщики услуг проводного широкополосного доступа на сегодняшний день обеспечить не могут. [3].

8. Преимущества стандартов IEEE 802.16 по сравнению с другими стандартами

Технология WiMAX, реализованная в стандартах IEEE 802.16 была разработана с целью предоставления универсального беспроводного доступа для широкого спектра устройств (рабочих станций, бытовой техники "умного дома", портативных устройств и мобильных телефонов) и их логического объединения - локальных сетей. Надо отметить, что эта технология имеет ряд преимуществ.

- По сравнению с проводными (xDSL, T1), беспроводными или спутниковыми системами сети IEEE 802.16 должны позволить операторам и сервис-провайдерам экономически эффективно охватить

не только новых потенциальных пользователей, но и расширить спектр информационных и коммуникационных технологий для пользователей, уже имеющих фиксированный (стационарный) доступ.

- Стандарт объединяет в себя технологии уровня оператора связи (для объединения многих подсетей и предоставления им доступа к Интернет), а также технологии "последней мили" (конечного отрезка от точки входа в сеть провайдера до компьютера пользователя), что создает универсальность и, как следствие, повышает надёжность системы.
- Беспроводные технологии более гибки и, как следствие, более просты в развёртывании, так как по мере необходимости могут масштабироваться.
- Простота установки как фактор уменьшения затрат на развертывание сетей в развивающихся странах, малонаселённых или удалённых районах.
- Дальность охвата является существенным показателем системы радиосвязи. На данный момент большинство беспроводных технологий широкополосной передачи данных требуют наличия прямой видимости между объектами сети. WiMAX благодаря использованию технологии OFDM создает зоны покрытия в условиях отсутствия прямой видимости от клиентского оборудования до базовой станции, при этом расстояния исчисляются километрами.
- Технология WiMAX изначально содержит в себе протокол IP, что позволяет легко и прозрачно интегрировать её в локальные сети.
- Технология WiMAX подходит для фиксированных, перемещаемых и подвижных объектов сетей на единой инфраструктуре.

9. Выводы.

Протокол IEEE 802.16 разработан для организации беспроводного доступа на уровне мегаполисов, и призван решить проблему "последней мили", а также сократить финансовые расходы и временные затраты на разворачивание новых подключений, благодаря унификации решения. Если сегодня на подключение одного предприятия к сети может уходить несколько месяцев, то в будущем это будет возможно сделать за несколько часов или дней.

Точки доступа IEEE 802.16 устанавливаются на высотных зданиях и мачтах сетей сотовой связи. Работая в частотном диапазоне от 2 до 11 ГГц, они позволяют развернуть беспроводной доступ с шириной канала до 70 мегабит в секунду на сектор одной базовой станции и обеспечить передачу данных вне зоны прямой видимости. Полоса пропускания, выделяемая клиентам, может контролироваться на стороне провайдера, что позволит, к примеру, обеспечить физическим лицам канал на уровне DSL, а организациям до уровня T1.

Также стоит отметить, что протокол IEEE 802.16 предусматривает не только передачу данных, но и голоса, а также видео (в виде тех же данных), что позволит организовать на основе этого протокола сотовые сети с возможностью видеотелефонии (параллельный обмен голосовыми данными и видео), а также доступ к Интернету и Интранету.

Сети стандарта IEEE 802.16 можно использовать даже для создания беспроводной инфраструктуры в метро. На основе 802.16 становится возможной организация систем "Video on demand" (видео по требованию), когда абонент из дома сможет принимать на специальный бытовой телевизор или проигрыватель DVD фильм в цифровом формате прямо от провайдера.

Стандарт IEEE 802.16 может стать единой нормативной основой решения для операторов, возможности масштабирования которого позволят обеспечивать поддержку тысяч пользователей с помощью одной базовой станции и предоставлять обслуживание различного уровня. Например, один

комплекс базовой станции способен обеспечить скорость передачи данных, достаточную для одновременного обслуживания более 60 коммерческих предприятий с пропускной способностью, аналогичной каналам типа T1, и сотни жилых домов с пропускной способностью, аналогичной каналам типа DSL.

Стандарт IEEE 802.16 обладает множеством преимуществ по сравнению с другими стандартами: сделав возможным более массовое производство основанной на стандартах продукции с меньшим количеством вариантов, он приведет к снижению стоимости оборудования, а наличие стандартизированного оборудования приведет к усилению конкуренции, что, в свою очередь, позволит абонентам выбирать, за услуги какого поставщика платить свои деньги. Для регионов со слаборазвитой проводной инфраструктурой, включая многие развивающиеся страны, важность стандарта IEEE 802.16 будет обусловлена как простотой внедрения, так и низкой стоимостью решений на его основе. [5].

Контрольные вопросы и задания

1. Приведите основные характеристики стандарта IEEE 802.16.
2. Поясните основные принципы построения беспроводных сетей, работающих в стандарте IEEE 802.16.
3. Поясните принцип организации роуминга.
4. Дайте краткое описание режимов работы, предусмотренных в стандарте IEEE 802.16e.
5. Опишите основные преимущества стандартов IEEE 802.16 по сравнению с другими стандартами.
6. Поясните принцип организации решетчатой сетевой топологии.

Список литературы.

1. И.В.Шахнович. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006, 288 с.
2. Дж. Гейер. Беспроводные сети. Первый шаг. //Пер. с англ. под ред. В.С.Гусева. М.: Издательский дом 'Вильямс', 2005, 192 с.
3. В.М.Вишневецкий, А.И.Ляхов, С.Л.Портной, И.В.Шахнович. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005, 592 с.
4. И.В.Шахнович. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц. / Электроника: Наука, Технология, Бизнес №1, 2005, с.8-14.
5. И.В.Шахнович. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16-2004. Режим OFDMA и адаптивные антенные системы. / Электроника: Наука, Технология, Бизнес №2, 2005, с.45-52.
6. Владимир Романченко. <http://www.ispreview.ru/article62.html>
7. Сергей Пахомов. Скоростная связь без проводов, или Стандарт 802.16. КомпьютерПресс, № 2, 2005.