

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

На правах рукописи
УДК 621.396.93

ИБРАГИМОВ ДОНИЁР БАХТИЁРОВИЧ

Беспроводные системы абонентского доступа WiMAX

**5A311201 – Системы и устройства телевидение, радиосвязи и
радиовещание**

**Диссертация
на соискание академической степени магистра**

**Научный руководитель:
К.т.н., доц. Р.Р.Ибраимов**

Ташкент 2013

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ, ИНФОРМАТИЗАЦИИ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

Факультет РРТ

Кафедра Телевидение и
радиовещание

Учебный год 2012/2013

Магистрант Ибрагимов Д.Б.

Научный руководитель Ибраимов Р.Р.

Специальность 5А311201 – Системы и
устройства телевидение, радиосвязи и
радиовещание

АННОТАЦИЯ МАГИСТРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Магистерская диссертация посвящена анализу существующих беспроводных широкополосных сетей на базе технологии WiMAX и Mobile WiMAX, а также методике проектирования таких сетей с примером расчета. Анализ проводился путем комплексного исследования характеристик и особенностей применения беспроводного широкополосного доступа с использованием методов анализа, синтеза, индукции и дедукции полученных результатов. Значимость полученных результатов заключается в том, что материалы диссертационной работы могут быть использованы при развертывании сетей широкополосного беспроводного доступа с использованием технологии Mobile WiMAX и WiMAX.

Научный руководитель _____

Магистрант _____

THE STATE COMMITTEE FOR COMMUNICATION,
INFORMATIZATION AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

Faculty RRT

Student Agzamov M.M.

Pulpit Television and radio
broadcasting

Scientific advisor Tadjibaev Sh.Z.

Academic year 2012/2013

Speciality 5A311201 – Television systems and
devices, radio communication and
broadcasting

SUMMARY OF MASTER DISSERTATION

Abstract magistrate has dedicated analysis which belongs wide – band net of base of technology WIMAX and mobi WIMAX, and so method of design such nets for instance account.

Analysis was conducted in the way of complex research characteristic especially application of without mobile wide band access using methods of analysis, synthesis induction deduction were received results. Interpretation of receiving results are, concluding that the materials of thesis's work can be use explicating net wide – band without mobile has access to use Mobil technology of WIMAX and WIMAX

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1 Беспроводные сети передачи информации	9
1.1 Классификация беспроводных сетей передачи данных.....	9
1.2 Стандартизация в области телекоммуникаций.....	13
1.3 Беспроводные технологии в современных цифровых сетях.....	18
Выводы к главе 1	36
Глава 2 Стандарт WiMAX (IEEE 802.16)	37
2.1 Эволюция технологий беспроводной "последней мили"	37
2.2 Архитектура стандарта IEEE 802.16.....	41
2.3 Развитие стандарта 802.16 и его краткая характеристика.....	47
Выводы к главе 2	51
Глава 3 Модемы OFDM и многостанционный доступ OFDMA	52
3.1 Принципы построения и особенности модемов OFDM.....	52
3.2 MESH - сети.....	60
3.3 Особенности применения многостанционного доступа на основе OFDMA.....	62
3.4 Поддержка адаптивных антенных систем.....	71
Выводы к главе 3	74
Глава 4 Архитектура сетей мобильного WiMAX и предоставляемые услуги	75
4.1 Поддерживаемая мобильность в сети WiMAX	75
4.2 Варианты построения сетей WiMAX.....	76
4.3 Архитектура сети WiMAX с усовершенствованными функциями	82
Выводы к главе 4	85
Глава 5 Разработка сети WiMAX для широкополосного доступа в интернет	86
5.1 Выбор и расчет основных характеристик радиointерфейса	86
5.2 Расчет требуемой помехоустойчивости сети	93
5.3 Выбор оборудования базовых и мобильных станций.....	95

Выводы к главе 5	100
Заключение	101
Список литература	102

Введение

Обоснование темы диссертации и актуальность. В современном мире основным средством обмена информацией, будь то речь, телевизионная картинка или другие данные, являются цифровые сети передачи данных. Во многих случаях важнейшим требованием к таким сетям является мобильность.

В ряде случаев данный фактор может становиться ключевым при выборе технологии для построения цифровой сети передачи данных, особенно при развертывании сетей в непригодных и старых зданиях, развертывании временных сетей, в условиях большой пространственной протяженности каналов связи, динамического изменения состава сети и положения ее абонентов. В таких случаях эффективным решением может быть использование беспроводных цифровых сетей передачи данных.

В конце XX — начале XXI в. уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже вдвое больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов, и это только начало. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба.

В свою очередь широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение. Это важно и для Республики Узбекистан, с протяженной территорией и значительным разбросом населения, особенно в северной её части. Поэтому исследование и проектирование беспроводных широкополосных сетей является актуальной задачей.

Объект и предмет исследований. *Объектом* исследования являются беспроводные широкополосные информационной сети на основе технологии Mobile WiMAX для предоставления услуги доступа в Интернет. *Предмет* исследований – научно обоснованные рекомендации по методике проектирования подобных сетей.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является комплексный анализ существующих беспроводных широкополосных сетей на базе технологии Mobile WiMAX и методика проектирования таких сетей с примером расчета.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- дать комплексную характеристику беспроводным широкополосным сетям на базе технологии WiMAX и Mobile WiMAX;
- выбрать методику проектирования для беспроводных широкополосных сетей на базе технологии Mobile WiMAX.

Гипотеза исследований. При проведении исследований предполагалось, что результаты могут быть использованы при проектировании беспроводных широкополосных сетей на базе технологии Mobile WiMAX.

Краткий литературный обзор по теме диссертации. В настоящее время в научных публикациях посвященных телекоммуникационным вопросам, большое внимание уделяется разработке и внедрению беспроводных широкополосных сетей предназначенных для доступа в интернет и особенно в мобильном варианте. Данным вопросом занимаются практически все ведущие компании мира, разрабатывающие оборудование для информационно-телекоммуникационных технологий. Результатом этих работ являются опубликованные соответствующие стандарты и материалы в специализированных и популярных изданиях.

Методы исследований. В работе были использованы методы анализа, синтеза, индукции и дедукции полученных результатов исследований беспроводных широкополосных сетей на базе технологии Mobile WiMAX.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Проведен анализ широкополосных беспроводных систем доступа к телекоммуникационным сетям;
2. Подробно рассмотрена система беспроводного широкополосного доступа на основе технологии Mobile WiMAX;
3. Рассмотрена методика проектирования и приведен пример расчета сети широкополосного беспроводного доступа на основе технологии Mobile WiMAX;
4. Материалы диссертации могут быть использованы при развертывании сетей широкополосного беспроводного доступа с использованием технологии Mobile WiMAX.

Научная новизна исследований состоит в том, что проведено комплексное исследование беспроводной широкополосной сети на базе технологии WiMAX.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Основной текст диссертации занимает 104 страниц машинописного текста. Работа содержит 17 рисунка, включая графики, 4 таблиц, а также список литературы из 33 наименований.

Глава 1 Беспроводные сети передачи информации

1.1 Классификация беспроводных сетей передачи данных

Наиболее популярными критериями для классификации беспроводных цифровых сетей передачи данных являются:

- по географической протяженности - персональные (WPAN), локальные (WLAN), региональные (городские, WMAN) и глобальные (WWAN);
- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- по применяемой технологии связи — радиорелейные, спутниковые, атмосферные оптические, сотовые, транкинговые и т.д.;
- по частотному диапазону - радио, оптические, инфракрасные и т.д.;
- по ширине полосы передачи - узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных;
- по локализации абонентов - фиксированные и подвижные.

Практически все рассматриваемые технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными

методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. Обычно полагают, что если ширина спектральной полосы F , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы f_c , то система узкополосная (т.е. $F/f_c \ll 1$). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т.е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты. В дальнейшем под термином «широкополосная система» понимаются такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства, связанные с широкой рабочей полосой. Поэтому точный критерий не существует, да и невозможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двухсмысленности является беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта часто изначально разрешается к использованию только для предоставления услуг фиксированной связи, но как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи. Технологически его никак нельзя «зафиксировать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить

с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в другую без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10-15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1-10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстоянии до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Недавно появилось семейство стандартов на широкополосные беспроводные сети городского масштаба IEEE 802.16. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или

видеоинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно продемонстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрии) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить нереально. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеоинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в опре-

деленных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером является появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета).

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

Следует также отметить, что приведенные критерии, применяемые для классификации беспроводных сетей являются взаимозависимыми, то есть выбор значения одного из этих параметров проектируемой сети в зависимости от ее назначения или по иным соображениям определяет область возможных значений остальных с точки зрения эффективности, стоимости и сложности реализации.

1.2 Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготовителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы

будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный телекоммуникационный союз (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вобрали в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB - • International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного телекоммуникационного союза ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D, был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась 140 лет назад, 17 мая 1865 г., в Париже, когда представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный

телеграфный союз - International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи. С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 20-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших в практике реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что современная структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций: тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова isos (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная

электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association) в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация

электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE явление американское. Но сама история этой организации показывает насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineer). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга и созданию первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате

был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящего курса особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В Узбекистане вопросами стандартизации специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE.

1.3 Беспроводные технологии в современных цифровых сетях

Рассмотрим истории развития различных технологий связи, применяемых в современных беспроводных цифровых сетях передачи данных, до сегодняшнего их состояния и перспективы совершенствования в ближайшем будущем.

Радиорелейные беспроводные сети. Системы радиосвязи, работающие на длинных и коротких волнах, позволяли осуществлять связь на большие расстояния без использования ретрансляторов, но имели малую емкость - один или несколько телефонных или телеграфных каналов на 1 несущую частоту - и очень нестабильное качество передачи, сильно зависящее от атмосферных, ионосферных и солнечных условий. Для получения качества связи, сравнимого с обеспечиваемым проводной связью в 1930-е годы была разработана так называемая радиорелейная технология связи - было обнаружено, что волны сантиметровой длины, что соответствует частотам около 1,5 ГГц, имеют схожую с оптическими волнами природу и могут быть сфокусированы в узкие лучи с помощью параболических антенн для

передачи в пределах прямой видимости. Таким образом, используя сеть ретранслирующих станций, находящихся в зоне прямой видимости друг с другом на расстояниях около 50 км, можно существенно повысить качество связи.

Однако, высокочастотный генератор, разработанный А. Мейснером в 1914 году позволял генерировать волны частотой только до 10 МГц. Решение проблемы было предложено в 1920 году немецким физиком Г. Баркхаузенем в виде специальных электронных ламп скоростной модуляции. Первая электронная лампа такой конструкции, клистрон, появилась в 1930 году; в 1934 за ней последовал магнетрон и в конце 1940-х - лампа бегущей волны (ЛБВ).

Эра радиорелейной связи началась 26 января 1934 года, когда первая коммерческая радиорелейная сеть связала Францию и Великобританию. Это стало возможно благодаря разработкам группы инженеров во главе с Андрэ Клавьером в Центральной Лаборатории Телекоммуникаций (LCT) в Париже. Новая технология набрала популярность и стала быстро развиваться и привело к появлению в Германии в 1939 году одноканального оборудования, работающего на частоте 500 МГц, и в 1939 году - первого в мире десятиканального оборудования, работающего на частоте 1,3 ГГц, которое разработал К.Лоренц. Было налажено достаточно крупное производство этих систем для использования в огромной по тем временам военной сети общей протяженностью около 50000 км, состоявшей из 2500 станций. В дальнейшем аналогичное оборудование было разработано во многих европейских странах и использовалась во время Второй Мировой войны. После войны компании AT&T и IT&T первыми воспользовались разработками в области радиолокации и перешли на использование высокочастотных волн в области 4 ГГц, что открыло новые возможности увеличения емкости систем радиорелейной связи. Результатом является, например, телефонная радиорелейная сеть между Нью-Йорком и Бостоном, которая начала работу в 1947 году и имела емкость в 480 ТЛФ каналов в обоих направлениях.

Импульс для дальнейшего развития радиорелейные сети связи получили в начале 1950-х годов с появлением телевидения. Передача телевизионного сигнала с типичной шириной спектра 4 МГц для черно-белого сигнала и 6 МГц для цветного была невозможна при использовании кабеля типа "симметричная пара" и очень дорога при использовании коаксиального кабеля, а радиорелейные системы связи позволяли передавать широкополосный телевизионный сигнал при использовании несущей частоты в диапазоне от 2 до 20 ГГц. Первая национальная радиорелейная телесеть начала работу в США в 1949 году и использовалась для трансляции инаугурации президента Г. Трумэна, а настоящим достижением стала трансляция коронации королевы Великобритании Елизаветы II 2 июня 1951 года на 7 европейских стран.

Применение полупроводниковых диодов и полевых транзисторов в 1960-х годах позволило значительно уменьшить энергопотребление оборудования (на 80%) , его размер (на 50%) и стоимость, получить емкости систем связи до 2700 (1963 год, Италия) и 3600 (1977 год, Япония) телефонных каналов на 1 несущую частоту. В конце 1970-х годов были созданы системы радиорелейной связи с одной боковой полосой, подавлением несущей и амплитудной модуляцией (SSB-AM), что позволило получить емкость в 5400 (Япония) и 6000 (США) каналов. Однако, потребность в аналоговых системах такой емкости резко сократилась в результате того, что начался перевод телефонных станций на цифровое оборудование, и возникла необходимость передачи данных по радиорелейным линиям связи в цифровом виде.

В СССР начало развитию радиорелейной промышленности положено в середине 50-х годов, когда были созданы СКБ, НИИ и группа заводов, затем последовал выпуск нескольких поколений радиорелейных станций (РРС). Первая магистральная радиорелейная система Р-600 была создана в 1958 году. В 1970 году появился комплекс унифицированных радиорелейных систем "КУРС". Все это позволило в 1960-1970-е годы развить сеть связи

страны, обеспечить качественную телефонию и наладить передачу программ центрального телевидения. К середине 70-х годов в стране была построена уникальная радиорелейная линия, протяженность которой составляла около 10 тыс. км, емкостью каждого ствола, равной 14400 каналов тональной частоты. Суммарная протяженность РРЛ в СССР превысила к середине 70-х годов 100 тыс. км.

Первая цифровая радиорелейная система связи была введена в строй в Японии в 1969 году. Оборудование работало на частоте 2 ГГц и обеспечивало емкость передачи 17 Мбит/с, что соответствовало 240 телефонным каналам. Первоначально подобные системы использовались для связи между цифровыми телефонными станциями и для связи цифровых телефонных станций с существующими аналоговыми сетями. Развитие электроники и появление цифровых радиорелейных систем связи большой емкости в 1980-х годах позволило этой технологии добраться до 50% использования в области телефонии и практически до 100% в телевидении.

Успешная реализация сети передачи данных на оптоволоконном кабеле, быстрый рост требований к емкости и протяженности сетей связи в 1980-х годах и особенно появление синхронной цифровой иерархии (SDH) дало новый импульс развитию цифровых радиорелейных сетей передачи данных. В результате этих новаций и изобретения новых технологий, таких как передача с использованием нескольких несущих частот, устранение межполяризационной интерференции и т.д., привело к появлению в середине 1990-х годов к возможности передачи данных на уровнях 155- Мбит/с, 2x155-Мбит/с и 622- Мбит/с.

Особые свойства, которые отличают радиорелейную связь от традиционной проводной, делают ее привлекательной для использования в глобальных, региональных и местных сетях передачи данных в тех случаях, когда требуется осуществить быстрое развертывание сети передачи данных в районах с неразвитой связной инфраструктурой или при создании сетей передачи данных, обслуживающих подвижных абонентов. Опыт применения

радиорелейных линий выявил ряд достоинств этого рода связи, которые значительно расширяли возможности связи вообще. Это:

- быстрота и экономичность развертывания (по сравнению с проводной связью) линий связи;
- экономически выгодная, а в ряде случаев и единственно возможная организация многоканальной связи на территориях, имеющих сложный рельеф (лес, горы, болота и пр.), а также в тех местах, где прокладка кабеля нецелесообразна;
- возможность аварийного восстановления связи магистралей проводной связи путем замены ее поврежденных участков;
- качество связи, не уступающее проводной связи.

В настоящее время высокоскоростные большой емкости радиорелейные линии применяются в качестве магистральных в глобальных сетях передачи данных. Среднескоростные средней емкости радиорелейные линии – для создания региональных, зональных сетей передачи данных. Наконец, малоканальные широко используются для организации связи на железнодорожном транспорте, газопроводах, нефтепроводах, линиях электропередачи и т. п. Малоканальные радиорелейные линии с подвижными РРС применяются в военных целях.

Спутниковые сети передачи данных. Спутниковая радиосвязь является одной из самых молодых областей беспроводной связи. Тем не менее, еще до запуска активных спутников-ретрансляторов проводились эксперименты по использованию Луны в качестве пассивного ретранслятора для связи на большие расстояния в 1940-х и 1950-х годах. И, по крайней мере, для одного чрезвычайно важного вопроса был получен ответ - через ионосферу Земли лучше всего проходят радиоволны в диапазоне от 1 до 10 ГГц. В этом диапазоне, так называемом микроволновом окне, наблюдается минимальное влияние космического шума и минимальное ослабление электромагнитных волн. В результате в июле 1954 года инженерами военно-морского флота США через Луну были переданы первые голосовые

сообщения, а через 2 года первая постоянная линия связи с использованием Луны в качестве ретранслятора была установлена между Вашингтоном и Гавайями. В качестве антенн на обоих концах использовались вращающиеся радиотелескопы диаметром 25 м.

В дальнейшем вместо Луны в качестве пассивных ретрансляторов стали использоваться воздушные шары. Государственное агентство NASA с помощью компаний Bell Laboratories и Jet Propulsion Laboratories в 1956 году начало разработку спутника-ретранслятора Echo-1, который являлся алюминизированным пластиковым воздушным шаром диаметром 30 м и весом 50 кг. 12 августа 1960 года он был доставлен на высоту 1600 км ракетой Delta, и с его помощью была установлена двусторонняя телефонная связь между Голдстоуном, штат Калифорния, и Холмделом, штат Нью-Джерси на частоте 136 МГц. Еще более впечатляющим достижением была установка трансатлантической связи с Францией с помощью Echo-1 в том же месяце. Спутник Echo-2 был запущен 25 января 1964 года на орбиту 1300 км.

Разработки активных космических спутников велась достаточно интенсивно в течение 1950-х годов, однако весь мир был шокирован, когда 4 октября 1957 в СССР был запущен Спутник-1, который находился на эллиптической орбите 229/946 км 21 день и передавал данные космической телеметрии на частотах 20 и 40 МГц. Пока в США шло соревнование государственных ведомств, занимавшихся разработкой спутников и ракетоносителей, 3 ноября в СССР был запущен Спутник-2 с собакой Лайкой на борту на орбиту 224/1661 км. Наконец, в США 31 января 1958 был запущен спутник Explorer-1, двухметровый цилиндр весом 14 кг, на орбиту 360/2500 км, передававший данные космической телеметрии в течении 5 месяцев, что стало значительным достижением. Первый успешный запуск американского спутника другой серии, Vanguard, был произведен 17 марта 1958 года на орбиту 651/3960 км. Он стал первым спутником, имевшим ртутные и солнечные батареи. После выхода из строя ртутных батарей после

3 месяцев работы приемник и передатчик Vanguard продолжали работать на солнечных батареях до 1965 года.

Военно-воздушные силы США запустили первый коммуникационный спутник Score 18 декабря 1958 года. Это был спутник с отложенной ретрансляцией, который получал данные с Земли на частоте 150 МГц, записывал на магнитную пленку и через некоторое время ретранслировал их.

Учитывая предыдущий опыт с пассивными спутниками-ретрансляторами Echo и располагая новыми изобретениями, такими как надежные транзисторы, солнечные батареи и микроволновые резонаторы, компании AT&T и Bell Laboratories приняли решение начать разработку активного спутника-ретранслятора Telstar. Главными целями разработки были установка трансатлантической связи, исследование в областях многоканальной двунаправленной передачи голоса, телевизионного изображения и данных, управления крупными спутниковыми антеннами, изучения магнитных поясов Ван Аллена и космического излучения. Для передачи со спутника на Землю была выбрана частота 4 ГГц для минимизации влияния дождя. Для передачи на спутник была выбрана частота 6 ГГц. Для обеспечения трансатлантической связи была выбрана эллиптическая орбита 960/6140 км, что обеспечивало общую видимость из Франции и США примерно на полчаса в сутки. Спутник был успешно доставлен на орбиту ракетой Delta 10 июля 1962 года.

23 июля 1962 года трансатлантической трансляцией речи президента США Кеннеди, бейсбольного матча и звука часов Big Ben в Лондоне началась эра коммерческих космических телекоммуникаций.

Первый спутник для синхронных коммуникаций, Syncom I, был разработан компанией Hughes Aircraft и запущен на орбиту 36000 км агентством NASA 14 февраля 1963 года, однако перестал отвечать на команды после 20 секунд работы. Тем не менее, идея использования спутников на геостационарной орбите для коммуникаций стала реальностью 26 июля 1964 года, когда на орбиту был доставлен спутник Syncom II. Он стал

использоваться для телефонной, телексной и факсимильной связи между Америкой, Европой и Африкой. 19 августа 1964 года был запущен Syncom III, в зону покрытия которого вошел Тихоокеанский регион, что позволило осуществить прямую трансляцию открытия Олимпийских игр в Токио III на США. Из-за простоты спутника аудиосигнал трансляции передавался по подводному коаксиальному кабелю. Для сравнения, во время Олимпийских игр в Сиднее в 2000 году с помощью 35 геостационарных спутников было передано 3400 часов прямых телетрансляций для 3,4 миллиарда зрителей в 220 странах мира.

К концу XX века на орбите насчитывалось примерно 250 телекоммуникационных геостационарных спутника.

Первые телекоммуникационные спутники использовались для широкополосной трансконтинентальной связи и связи на большие расстояния в качестве замены радиорелейным сетям связи, но появление в 1980-х годах волоконно-оптических линий связи изменило основное направление использования таких спутниковых систем связи в сторону систем доставки данных и ТВ-сигнала, а также спутниковых сетей передачи данных.

Первая глобальная спутниковая сеть передачи данных, Intelsat, начала работу в январе 1969 году и к концу XX века насчитывала 20 спутников и 144 стран-участниц. Вторая глобальная спутниковая сеть передачи данных, InterSputnik, была запущена в ноябре 1971 года в СССР.

В настоящее время в мире насчитывается множество региональных спутниковых сетей передачи данных, покрывающих весь Земной шар, несколько спутниковых систем навигации, таких как Inmarsat (с 1981 года), Inmarsat Aero (с 1987 года), GMDSS как замена сигналу SOS[^] 1991 году); спутниковые сети связи также предоставляют сервисы позиционирования - GPS, Euteltracs, ГЛОНАСС.

Появившаяся в 1980-е годы концепция предоставления прямой спутниковой связи индивидуальным пользователям была реализована в

системах связи Iridium (разработка началась в 1987 году, сеть запущена в 1997 году), Aries (запущена в 2002-2003 годах), Ellipso, Globalstar (октябрь 1999 года).

Мультимедийный спутниковый сервис с конца XX века предоставляется пользователям сетями Teledesic (с 1998 года), SkyBridge (с конца 2002 года), Cyberstar (2003 год), Netstat 28 (с 2002 года), FAISAT (1995 и 1997 год), обеспечивая услуги "последней мили" для доступа к Интернет и другим сетям, услуги электронной почты, файлового обмена.

В настоящее время перспективными решениями на базе спутниковых систем передачи данных являются решения по обеспечению покрытия сотовыми сетями удаленных и труднодоступных мест, предоставления услуг фиксированной спутниковой связи для доступа в Интернет и организации региональных цифровых коммуникационных сетей.

Сотовые сети. Радиотелефонная связь берет свое начало в г. Сент-Луис (США) в 1946 году. Первые радиотелефоны использовали стандартные фиксированные каналы связи, при этом переключение с канала на канал в случае, если один занят, производилось вручную абонентами. В результате исследований, направленных на совершенствование технологий индивидуальной связи, уже в конце 40-х годов исследовательским центром Bell Laboratories американской компании AT&T было предложено разбить всю обслуживаемую зону на некоторые небольшие участки, которые получили название сота. В основе идеи лежало то, что одна сота обслуживается передатчиком с фиксированной частотой и ограниченным радиусом действия, что позволило бы в каждой из них использовать одну и ту же частоту. Реализация этой идеи смогла быть воплощена в жизнь на аппаратном уровне только через 30 лет.

Создание единого стандарта сотовой связи для 5 североевропейских стран — Швеции, Финляндии, Исландии, Дании и Норвегии, было начато еще в конце 70-х годов и получило название NMT-450 (Nordic Mobile Telephone). Данный стандарт работал в диапазоне 450 МГц. Разработанный

стандарт начал действовать в 1981 году. Стоит отметить, что он начал функционировать в Саудовской Аравии. Постепенно на базе этого стандарта и его модифицированные версии начали появляться новые сети, которые стали использоваться и в других странах Европы (Австрии, Голландии, Бельгии, Швейцарии) и странах Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока. Существенно увеличить абонентскую емкость системы и развить её функциональные возможности стало возможным в 1985 году с появлением нового стандарта NMT-900, который работал в диапазоне 900 МГц

В результате ряда успешных испытаний в 1983 г. в США, в Чикаго, начала свое функционирование новая сеть стандарта AMPS (Advanced Mobile Phone Service), разработанная в исследовательском центре Bell Laboratories.

Уже на основе этого стандарта в Великобритании в 1985 году в качестве национального был взят стандарт TACS (Total Access Communications System). Спустя два года в 1987 году в Лондоне в связи со значительным увеличением числа абонентов сотовой связи произошла расширение рабочей полосы частот. Модификация существующего стандарта получила название ETACS (Enhanced TACS).

Следует отметить, что все рассмотренные выше стандарты являются аналоговыми и принадлежат к первому поколению систем сотовой связи. Передача информации производится с помощью обычной частотной (ЧМ) или фазовой (ФМ) модуляции, как и в обычных радиостанциях.

Существенные недостатки систем сотовой связи первого поколения - возможность прослушивания разговоров другими абонентами, замирание сигналов под воздействием окружающего ландшафта и зданий или в результате передвижения абонентов, послужили толчком развития цифровых систем сотовой связи.

В 1982 году Европейской Конференцией Администраций Почт и Электросвязи (СЕРТ) была организована специальная группа Groupe Special Mobile с целью создания европейского стандарта цифровой сотовой связи — GSM, первая сеть на основе которого была построена в 1990 году. Также в

1990 году в США был утвержден новый стандарт цифровой связи - IS-54, который более известен как D-AMPS или ADC. Параллельно на основе технологии шумоподобных сигналов и механизма кодового разделения каналов (CDMA) компания Qualcomm стала разрабатывать новый стандарт сотовой связи. Спустя год, в 1991 году, после появления системы GSM в Европе на её основе был создан стандарт DCS-1800 (Digital Cellular System 1800 МГц).

Совершенствование стандартов сотовой связи позволило в 1993 году Промышленной Ассоциации в области связи (TIA) США принять новый стандарт CDMA, который был назван IS-95. Спустя всего два года - в сентябре 1995 г. - в столице Китая (Гонконге) начала работать первая сеть стандарта IS-95. Тем временем первая сеть DCS-1800 One-2-One начала функционировать в Великобритании 1993 году.

Следующий этап развития сотовой связи - это системы третьего поколения, отличительной чертой которых должна стать унифицированная система радио доступа. Универсальная система подвижной связи (UMTS) разработана в Европе и позволяет объединять возможности уже существующих цифровых систем связи в единую систему третьего поколения FPLMTS (Future Public Land Mobile Telephone System) и предоставлять стандартизированные услуги подвижной связи абонентам. Для этих целей будут предоставлены полосы шириной в 60 МГц для стационарных станций и 170 МГц - для подвижных станций, из диапазона частот 1 - 3 ГГц. В 2000 году были начаты испытания наземных составляющих системы, а на 2010 год намечены запуск спутниковой подсистемы FPLMTS в полосах частот 1980-2010 и 2170-2200 МГц.

Системы третьего поколения (3G) обеспечивают передачу речи высокого качества, видео-изображения и доступ к Internet (пропускная способность до 2 Мбит/с). На текущий момент не существует единой системы для операторов всего мира, хотя попытки создания уже предпринимались, которые пока имели незначительный успех. Современные

3G терминалы обычно поддерживают только один из 3 имеющихся стандартов: W-CDMA (WideBand Code Division Multiple Access), cdma2000 или UWC-136.

Беспроводные персональные сети передачи данных - представляют собой один из видов современных беспроводных сетей, главной особенностью которого является малая область охвата, обычно в пределах возможностей доступа человека. Их основное предназначение - объединение в сеть передачи данных мобильных и периферийных устройств.

В 1995 году стало очевидно, что недорогая по стоимости и экономичная по энергопотреблению беспроводная связь уже достижима, что позволит связывать небольшие портативные устройства между собой специальным способом (ad-hoc), задаваемым для конкретных целей.

В начале 1998года компании Ericsson, Nokia, IBM, Toshiba и Intel объединились с целью создания технологии беспроводного соединения между мобильными устройствами и периферийной техникой. 20 мая 1998 года произошло официальное представление специальной рабочей группы (SIG, Special Interest Group). 26Июля 1999 года компании Ericsson, Nokia, IBM, Toshiba и Intel объявили о выпуске спецификации Bluetooth 1.0, определяющей скоростной беспроводный способ связи и подключения к Интернету мобильных ПК и коммуникационных устройств.

В 2000-2001 годах были представлены первые мобильный телефон, наушники, принтер, портативный компьютер и автомобильный комплект "hands-free", поддерживающие технологию Bluetooth. В 2002 году IEEE одобряет спецификацию 802.15.1, как соответствующую беспроводной технологии Bluetooth, а в 2003 году Bluetooth SIG одобрила версию Bluetooth 1.2. В том же году появляется первая медицинская система, одобренная Управлением по контролю за продуктами и лекарствами США.

В 2004 году Bluetooth SIG одобряет версию Bluetooth 2.0 + Enhanced Data Rate (EDR), обеспечивающую значительное увеличение пропускной способности сети передачи данных. В это время парк Bluetooth-устройств

достигает 250 миллионов устройств. К 2007 году были представлены первые часы, цифровая фоторамка, радиобудильник и телевизор, поддерживающие Bluetooth, а парк Bluetooth-устройств достигнул отметки в 1 миллиард штук.

Альтернативная технология персональных беспроводных сетей передачи данных ZigBee начала свое развитие с конца 1990-х годов как технология низкоскоростных сетей передачи данных с очень низким энергопотреблением в диапазонах 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц. В 2003 году была выпущена официальная спецификация, получившая статус стандарта IEEE 802.15.4, а за год до этого была создана организация ZigBee Alliance для поддержки и развития стандарта, а также для обеспечения совместимости между устройствами. В декабре 2006 года выпущена спецификация "ZigBee Feature Set", а 25 октября 2007 - спецификация "Home Automation Profile".

Основная область применения данной технологии - это беспроводные сети датчиков, системы автоматизации зданий, устройства автоматического считывания показаний счетчиков, охранные системы, системы управления в промышленности.

До 1989 года для обозначения сверхширокополосных систем пользовались понятиями сигналов "без несущей", "импульсных", "несинусоидальных" и т.п. Определение термина "сверхширокополосные устройства" (UWB) введено агентством DARPA Министерства обороны США в 1990 году и скорректировано Федеральной комиссией связи США (FCC) в 2000 году. По определению FCC, к UWB-устройствам относятся все системы со спектральной полосой не менее 1,5 ГГц.

Работы в области сверхширокополосных систем начались в конце 50-х годов в связи с развитием радиолокационной техники как в США, так и в СССР. В результате в 1974 году Морей разработал UWB-радарную систему для исследования подземных объектов, что явилось толчком для нового направления - UWB-радаров для геолокации и локации "сквозь стены". В 1987 году компания Multispectral Solutions создала по заказу правительства США коммуникационную систему с высокой скрытностью и

помехоустойчивостью (с малой вероятностью обнаружения и противодействия, LPI/D). В 1987 году в США Ларри Фуллертон основал компанию Time Domain, которая за десять лет работы со своей технологией PulsOn превратилась в одного из лидеров в области портативных UWB коммуникационных связных систем и радаров.

В настоящее время из-за чрезвычайно малых мощностей, законодательно разрешенных к применению в ряде стран, данная технология используется для высокоскоростной связи на малые расстояния при очень низких затратах энергии (до 480 Мбит/с на расстоянии до 3 м).

Беспроводные локальные сети передачи данных. Рынок массовых устройств для локальных беспроводных сетей очень молод - первые устройства для построения беспроводных локальных сетей появились в начале 1990-х годов, однако к 2005 году в месяц в мире по оценкам продавалось около миллиона адаптеров только стандарта IEEE 802.11b.

Работы в этом направлении начались в конце 1980-х годов, а в 1989 году была основана рабочая группа 11-го комитета IEEE. Тем не менее, до 1997 года ни одного стандарта в этой области не существовало, и имеющееся на рынке оборудование разных производителей было несовместимо между собой. Ситуация начала меняться с июля 1997 года, когда был издан стандарт IEEE 802.11 "Спецификация физического уровня и уровня контроля доступа к каналу передачи беспроводных локальных сетей". Он описывал архитектуру сети, требования к функциям устройств и т.д. Данный стандарт устанавливал 3 способа работы сети: 2 радиочастотных в диапазоне 2,4 ГГц и инфракрасный оптический при пропускной способности в 1 или 2 Мбит/с.

Следует отметить, что исходная спецификация IEEE 802.11 не получила широкого распространения из-за относительно низкой пропускной способности сети относительно проводных локальных сетей передачи данных. Проблему решило появление стандартов-дополнений IEEE 802.11b и 802.11a.

Первым стал утвержденный 16 сентября 1999 года стандарт IEEE 802.11b, описывающий усовершенствования исходного стандарта для работы в диапазоне 2,4 ГГц и предусматривавший увеличение пропускной способности сети до 5,5 и 11 Мбит/с. Одновременно с ним был принят стандарт IEEE 802.11a, описывающий работу сети в диапазоне 5 ГГц, в котором найти свободную широкую полосу для системы связи проще, чем в перегруженном диапазоне 2,4 ГГц. Был предложен набор значений пропускной способности — 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с.

В марте 2000 года начались работы над будущей спецификацией IEEE 802.11g, предназначенной для усовершенствования беспроводных локальных сетей в диапазоне 2,4 ГГц с учетом наилучших свойств предыдущих стандартов. Четкого ответа, однако, на вопрос о причинах переноса рабочего диапазона в область 2,4 ГГц из хорошо зарекомендовавшего себя и становящегося популярным диапазона 5 ГГц нет.

С 2002 года устройства IEEE 802.11g производятся фирмами Linksys, Cisco, D-Link, Apple и многими другими. Объем рынка оборудования для беспроводных локальных сетей быстро возрастал. В марте 2002 году компания Atheros выпустила первое промышленное решение типа "три-в-одном", поддерживающее стандарты IEEE 802.11a/b/g.

Параллельно продолжалось и развитие технологий семейства IEEE 802.11 в области обеспечения качества обслуживания (QoS) и безопасности. К 2001 году в механизме WEP, предусмотренным рассматриваемым семейством стандартов для обеспечения безопасности беспроводных коммуникаций было обнаружено несколько серьезных уязвимостей, позволяющих получить несанкционированный доступ к любой беспроводной локальной сети на основе данных стандартов в течение нескольких минут. По этой причине была начата разработка следующего дополнения к стандарту IEEE 802.11, получившего индекс i. 24 июня 2004 года его черновая версия была ратифицирована. До окончания разработки и официального выхода дополнения были предложены специальные временные методы,

позволяющие несколько снизить угрозы безопасности беспроводных локальных сетей IEEE 802.11. Данное дополнение было включено в обновленную версию стандарта, IEEE 802.11-2007, выпущенную 8 марта 2007 года. Другое важное дополнение к этому семейству стандартов, IEEE 802.11e-2005, было выпущено в 2005 и определяло модификации применяемых сетевых протоколов для обеспечения работы таких приложений, как передача голоса (VoIP) и мультимедиа-трансляции.

К 2004 году в результате развития проводных локальных сетей передачи данных (Gigabit Ethernet, 10Gigabit Ethernet) стало опять очевидно отставание их беспроводных аналогов, поэтому была начата работа по усовершенствованию стандарта IEEE 802.11-2007 для обеспечения соответствия современным требованиям к локальным вычислительным сетям. Публикация нового дополнения к стандарту, получившего индекс n, запланирована на декабрь 2009 года, однако уже в настоящее время на рынке появляется все больше оборудования, соответствующего черновой версии этой спецификации. Максимальная пропускная способность будущего стандарта установлена на уровне 600 Мбит/с.

Следует также отметить уникальный в своем роде стандарт DECT - задуманный для телефонии, он практически сразу стал использоваться для сетей передачи данных. Исторически DECT был предназначен для избавления пользователей телефонных аппаратов от соединительных шнуров. Прорывом стало появление цифровой спецификации СТ-2 в 1989г., разработанной в Великобритании. В 1992г. ETSI принял CAI/СТ-2 в качестве европейского стандарта. На его основе была создана система Telepoint, в которой впервые была фактически реализована микросотовая архитектура, обеспечивалась поддержка роуминга, перемещение между сотами без разрыва связи и т.д. Системам на основе этого стандарта предрекали большое будущее, но в результате резкого взлета технологий сотовой связи в середине 1990-х спрос на них упал.

Очень скоро внимание европейского телекоммуникационного сообщества переключилось на новую спецификацию - DECT. В 1988 году этот стандарт был одобрен Конференцией европейских администраций почты и электросвязи (CEPT), а в 1992 году появились первые спецификации на его основе. Фактически, DECT - это набор спецификаций, определяющих радиointерфейсы для различных видов беспроводных сетей связи, но его важнейшая задача - обеспечение совместимости оборудования различных производителей. В 1993 году были представлены первые продукты на его основе. В середине 1990-х годов, помимо технологии беспроводной телефонии, DECT в виду ряда преимуществ рассматривался как альтернатива локальным беспроводным сетям передачи данных на основе стандарта IEEE 802.11, однако с течением времени утратил свои позиции.

Однако неудачи в области сетей передачи данных превратились в достоинства для DECT в 2005 году, когда первые устройства стандарт DECT 6.0 появились на американском рынке, так как они не используют очень насыщенный диапазон в районе 2,4 ГГц.

Региональные беспроводные сети передачи данных используют частотные диапазоны свыше 1 ГГц и имеют относительно высокую выходную мощность. Своим развитием они изначально, в первую очередь, обязаны телевидению.

Первую беспроводную многоточечную систему распределения (MDS) Федеральная комиссия США (FCC) представила в 1970 году, однако стоимость оборудования оказалась неконкурентноспособной с кабельным и спутниковым телевидением. Через 25 лет на смену MDS пришли многоканальные системы MMDS, позволяющие работать в зоне радиусом 50-60 км на частотах 2,5-2,7 ГГц. Теоретически, пропускная способность одного канала в системе MMDS может достигать 64 Мбит/с. Кроме того, следует отметить, что эта система является однонаправленной, так как была разработана для телевещания. В дальнейшем производители стали добавлять обратный канал, но системы MMDS так и не завоевали популярность.

Следующим шагом стало появление концепции LMDS, испытания которой прошли в 1992 году в Нью-Йорке, а в 1998 году FCC начала лицензирование таких сетей связи. Первой реально действующей LMDS-системой стала сотовая телевизионная сеть компании Cellular Vision. Изначально LMDS предназначалась для работы в диапазоне 27,5-29,5 ГГц; в Европе затем появилась аналогичная система MVDS (диапазон 40,5-42,5 ГГц). Такие системы называют сотовым телевидением.

С 2000 года системы связи LMDS стали двунаправленными и стали использоваться для доступа в Интернет, а также интерактивного телевидения (Video on Demand). Отсутствие единого стандарта сдерживало внедрение этих систем, поэтому многие производители вообще отказались от выпуска оборудования для LMDS/MVDS.

Решением возникшей проблемы стал стандарт широкополосных региональных сетей IEEE 802.16, работа над которым началась в августе 1998 года. Опубликованный 8 апреля 2002 года новый стандарт описывал общие принципы построения систем беспроводного широкополосного доступа в диапазоне 10-66 ГГц. Версия стандарта для более низкого частотного диапазона был опубликован 1 апреля 2003 года и предусматривал использование диапазона 2-11 ГГц.

Сразу же была начата работа по объединению множества выпущенных дополнений к стандарту IEEE 802.16, и 24 июня 2004 года был официально утвержден новый документ - IEEE 802.16-2004. В настоящее время эта версия стандарта известна как описывающая технологию Fixed WiMAX. Версия IEEE 802.16-2005 2005 года определяет другую версию систем беспроводной широкополосной передачи данных - Mobile WiMAX, рассчитанную на применение мобильными пользователями. В 2006 и 2007 были произведены сертификации первых продуктов на основе упомянутых версий стандарта IEEE 802.16.

Выводы по главе 1

1. Критерии по которым классифицируются беспроводные сети являются взаимозависимыми, то есть выбор значения одного из этих параметров проектируемой сети в зависимости от ее назначения или по иным соображениям определяет область возможных значений остальных с точки зрения эффективности, стоимости и сложности реализации.

2. Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. В Узбекистане вопросами стандартизации специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE.

3. В современной беспроводной цифровой передаче данных применяются разнообразные технологии, охватывающие как фиксированные, так и мобильные сети.

Глава 2 Стандарт WiMAX (IEEE 802.16)

2.1 Эволюция технологий беспроводной "последней мили"

В последние годы возможность организации беспроводного абонентского доступа в качестве альтернативы традиционным решениям на медной паре вызывает все больший интерес. "Беспроводной подход" к проблеме доступа постепенно оформился в концепцию беспроводной "последней мили" (Wireless Local Loop, WLL), именуемую также фиксированным беспроводным доступом.

Основы концепции WLL были заложены в США несколько десятилетий назад при возникновении первых систем распределения телевизионного сигнала. Точкой отсчета, по-видимому, здесь можно считать 1970 г., когда американская Федеральная комиссия связи (FCC) предложила первую многоточечную распределительную систему (Multipoint Distribution System, MDS), в которой операторам выдавались лицензии на использование каналов MDS для предоставления услуг передачи цифровых данных или телепрограмм в радиусе около 30 миль (немногим менее 50 км). Первые MDS-системы работали в микроволновом диапазоне (2,1 - 2,7 ГГц), а сам сервис соответствовал, если применять современную терминологию, push-модели. Однако высокая стоимость оборудования, недостаточная надежность самой технологии и активное противодействие со стороны операторов сетей кабельного телевидения привели к тому, что идея, положенная в основу MDS, была отвергнута минимум на десятилетие

Сегодняшние многоканальные системы MDS (MMDS) впитали в себя многие из тех изменений, что последовали за принятием в США Телекоммуникационного акта 1996 г. Этим документом, в частности, восемь общеобразовательных каналов ITFS (Instructional Television Fixed Service) были преобразованы в полноценные MMDS-каналы, что заметно оживило конкуренцию провайдеров MMDS-сервиса с местными американскими

операторами сетей КТВ. Однако куда более важным результатом стал неподдельный интерес, проявленный к широкополосным беспроводным технологиям крупнейшими телекоммуникационными компаниями, которые открыли для себя способ оперативного выхода на новый рынок.

Поскольку сети MMDS в первую очередь были ориентированы на потребности телевидения, в них никогда не закладывалась возможность двунаправленной передачи и взаимодействия с подписчиками. Предоставление услуг доступа в Internet по такой сети требовало от операторов преодоления множества не встречавшихся ранее проблем. В то же время многим поставщикам MMDS-сервиса оно сулило баснословные прибыли. Сеть с топологией "точка - много точек" являлась идеальным решением для обслуживания обитателей крупных офисных центров, гостиниц и мотелей. Система с единственной всенаправленной антенной могла обеспечить предоставление услуг в радиусе 10 миль (16 км) по двум нисходящим каналам со скоростью передачи данных 30 Мбайт/с в каждом. В то же время провайдерам услуг беспроводного доступа в Internet требовались надежные и экономически эффективные системы, допускавшие интерактивность (т.е. наличие обратного канала). Им следовало выработать оптимальный протокол многоадресной рассылки, который бы позволил построить высокопроизводительную и одновременно насыщенную контентом среду, тем самым стимулируя абонентов к использованию инфраструктуры широкополосной сети MMDS для обмена электронной почтой и запуска Internet-приложений. Обратный же канал приходилось формировать при помощи кабельной сети доступа. Использование для этих целей телефонных каналов значительно усложняло структуру протоколов (по сравнению с TCP) и требовало развертывания в центральном офисе специального оборудования, поддерживавшего двунаправленный обмен данными.

Очередной качественный скачок пришелся на 1998 г., когда FCC обнародовала планы лицензирования еще одного широкополосного сервиса

передачи видео и данных, который получил название Local Multipoint Distribution Service (LMDS) или беспроводной волоконно-оптической сети (соответствующие технические испытания начались в Нью-Йорке еще в 1992 г.). Основное преимущество новой технологии состояло в использовании частот в диапазоне 28 ГГц (для нисходящего трафика была выделена полоса от 27,5 до 28,35 ГГц). Таким образом, суммарная ширина полосы частот для данного сервиса приближалась к 1 ГГц.

По сути дела сервис LMDS был создан с целью замены кабельной инфраструктуры на "последней миле" беспроводными соединениями и одновременного увеличения пропускной способности по сравнению с возможностями, которыми располагали операторы проводных сетей. В целом, затраты на развертывание и эксплуатацию систем LMDS, оказываются ниже стоимости кабельных решений, а скорость передачи данных при работе в лицензируемых частотных диапазонах 10, 26, 28 и 38 ГГц может достигать до 45 Мбит/с. Использование высоких рабочих частот накладывает существенные ограничения на дальность связи; типичный радиус сети LMDS находится в пределах 3 - 8 км. В то же время в каждом из диапазонов доступная полоса частот оказывается шире, чем в диапазонах 2,4 или 5 ГГц.

Увеличению скорости передачи способствует и то, что связь устанавливается между неподвижными устройствами. Приемопередатчик, с которым "общается" клиентское оборудование, имеет фиксированное местоположение и всегда остается в пределах единственной соты. Как правило, антенны для систем LMDS устанавливаются на крышах зданий для достижения прямой видимости между принимающим и передающим устройствами. К уязвимым местам данной технологии относится высокая чувствительность к состоянию атмосферы: например, осадки в виде дождя сильно искажают миллиметровый сигнал.

В системах LMDS применяются приемники и передатчики низкой мощности, использующие принцип частотной модуляции с разносом между

каналами 20 МГц. Один и тот же канал может задействоваться многократно при переходе от соты к соте. Архитектура LMDS обеспечивает высокую эффективность использования спектра. Подобно многим технологиям мобильной связи, основанным на ортогонально поляризованных частотно-модулированных сигналах, LMDS использует частотное перемежение в диагонально расположенных сотах, а также пространственное разделение сигналов. Летом 2000 г. появилась модификация сервиса LMDS, предусматривающая двунаправленную передачу данных, что открыло путь к использованию этих систем для интерактивных приложений. Под восходящий трафик были отведены частоты 29,1 - 29,35 ГГц.

Из всего многообразия технологий высокоскоростного беспроводного доступа LMDS предлагает идеальный способ преодоления узких мест на "последней миле". Возможно, именно эта технология предоставит доступ к мультимедиа-данным миллионам пользователей во всем мире, благодаря поддержке голосовых соединений, работы в Internet, видеоконференц-связи, потокового видео и других типов высокоскоростного трафика.

Однако сегодня, несмотря на многообещающее будущее, системы фиксированного широкополосного доступа не воспринимаются в качестве эффективного способа предоставления речевых и видеослужб, а также сервисов высокоскоростной передачи данных домашним и бизнес-пользователям. Уже развернутые LMDS-системы вынуждены доказывать свое право на существование, а такие ведущие производители, как Nortel и ADC, вообще отказались от планов выпуска LMDS-оборудования.

Одна из проблем, сдерживающих распространение систем LMDS, связана с отсутствием стандартов. В отличие от своих конкурентов из мира кабельного телевидения или DSL-доступа, провайдеры фиксированных широкополосных услуг беспроводной связи пока не сделали выбор в пользу единого стандарта. Одни поддерживают комбинированный подход на основе векторного ортогонального частотного мультиплексирования и технологии передачи данных по сетям КТВ (VOFDM/DOCSIS), другие придерживаются

устоявшихся схем модуляции, например квадратурной амплитудной (QAM), а кое-кто предпочитает патентованные разработки. Такая разногласица не только вызывает замешательства в умах потребителей, но и препятствует началу широкомасштабного выпуска LMDS-устройств.

Решение проблемы стандартизации началось в 1999 г., когда в стенах IEEE появилась рабочая группа 802.16, призванная навести порядок в секторе телекоммуникационного рынка и собрать производителей оборудования под единую спецификацию.

2.2 Архитектура стандарта IEEE 802.16

IEEE 802.16 или WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) в дословном переводе звучит как "глобальная совместимость для микроволнового доступа". Так называется международный отраслевой Консорциум, который намерен способствовать достижению совместимости всего оборудования, применяемого для широкополосного беспроводного доступа (ШБД). Сюда вошли такие известные производители чипсетов, как Intel, Fujitsu и примкнувшая к ним Nokia, а также такие известные компании как Asiros, Airspan, Alvarion, Aperto, Proxim и Wi-LAN. Сегодня Консорциум WiMAX объединяет 96 компаний.

IEEE 802.16 - это первый стандарт, предназначенный для создания территориально распределенных сетей широкополосного беспроводного доступа (Broadband Wireless Access) в масштабе города (Wireless MAN). В стандарте описывается интерфейс для систем ШБД типа "точка-многоточка", работающих в диапазонах частот 2-11 ГГц и 10-66 ГГц и осуществляющих связь на расстояниях в десятки километров (рис.2.1).



Рис.2.1 Сеть на основе WiMAX

Под WiMAX понимается технология операторского класса, которая практически не имеет на сегодняшний день альтернативы по предоставлению населению высококачественных услуг мультисервисного ШБД.

Именно мультисервисность и, как следствие, широкополосность характеризуют современные тенденции развития беспроводного доступа. В идеале, современный пользователь не должен испытывать ограничения на любые виды услуг, доступные в настоящее время через кабельные соединения, такие как SDH или Ethernet. Предполагается, что новейшие системы с сертификацией WiMAX позволят операторам сетей широкополосного доступа не только предоставить пользователям разнообразные типы сервисов как IP, так и E1, но и заменить инфраструктуру ADSL-доступа и выделенных линий в целом.

Первоначально усилия нового подразделения IEEE были сосредоточены на частотных диапазонах 28 и 30 ГГц, однако затем в его составе была сформирована новая подгруппа, занявшаяся областью 2,5 ГГц. Эта "низкочастотная" часть спектра отведена под услуги беспроводного кабельного видео, безуспешно конкурирующее с спутниковым телевидением. Она вполне пригодна и для приложений доступа в Internet, а, возможно, и для цифрового видео. Поскольку радиус зоны действия сети MMDS примерно равен 50 км, установив небольшое число антенн, можно охватить услугами территорию крупного мегаполиса.

Еще одно направление деятельности, бурно развивающееся в недрах 802.16, нацелено на использование для целей доступа нелицензируемых областей спектра. Его актуальность обусловлена занятостью (в США) лицензируемых частотных диапазонов немногочисленными существующими операторами систем LMDS и MMDS. В данном случае речь идет о частотах в области 5 и 6 ГГц, и здесь группа 802.16 активно сотрудничает с другим подразделением IEEE - 802.11.

Задачей рабочей группы 802.16 является стандартизация радиointерфейсов и дополнительных функций, необходимых для организации беспроводной "последней мили". Сформированные в ее стенах три подгруппы разрабатывают следующие стандарты:

- IEEE 802.16.1, определяющий радиointерфейс для систем, работающих на частотах от 10 до 66 ГГц;
- IEEE 802.16.2, регламентирующий вопросы совместимости разных систем широкополосного беспроводного доступа;
- IEEE 802.16.3, определяющий радиointерфейс для систем, работающих в лицензируемых диапазонах от 2 до 11 ГГц.

К настоящему моменту наибольший прогресс наблюдается в деятельности первой подгруппы, которая вызывает повышенный интерес операторов, поскольку ее результаты относятся к пока незанятым частотным диапазонам.

Все три спецификации опираются на абстрактную системную эталонную модель. Сервис, соответствующий будущим стандартам 802.16, обеспечит связь между абонентским оборудованием, которое может представлять собой одиночное устройство либо сеть (локальную, учрежденческую телефонную или сеть IP-телефонии), и магистральной сетью - ТфОП или Internet.

В эталонной модели определяются три радиointерфейса. Первый обеспечивает связь между абонентским приемопередающим устройством и базовой станцией и полностью определяется спецификациями 802.16. Второй

интерфейс необходим для взаимодействия приемопередающих устройств с проводными сетями, к которым они подключены. Это интерфейс абонентской сети (Subscriber Network Interface, SNI) и интерфейс сети базовых станций (Base Station Network Interface, BNI). Особенности данных интерфейсов находятся вне "сферы компетенции" стандартов 802.16, однако они включены в эталонную модель в связи с тем, что технологии абонентской и базовой сетей (та же АТМ) оказывают влияние на выбор технологии радиointерфейса и предоставляемых с его помощью услуг.

Наконец, третий интерфейс относится к факультативному использованию репитеров. Спецификации радиointерфейса допускают установку репитеров или отражателей для обхода препятствий, возникающих на пути распространения радиосигнала, и расширения радиуса действия соты.

Архитектура 802.16 определяет протоколы четырех уровней. Два нижних уровня соответствуют одному физическому уровню (PHY) эталонной модели OSI. Именно здесь выполняются такие операции, как кодирование и декодирование сигналов, генерация и удаление заголовков пакетов (для целей синхронизации), передача и прием отдельных битов. В стандарте 802.16, в описание физического уровня войдет также спецификация на параметры среды передачи и используемого частотного диапазона.

Над физическим уровнем расположены протоколы, отвечающие за предоставление услуг подписчикам. Сюда относятся передача пакетов (кадров) данных и контроль доступа к разделяемой среде передачи (Media Access Control, MAC).

Протокол 802.16 MAC определяет процедуру инициации передачи по радиоканалу со стороны абонента или базовой станции. Поскольку некоторые из вышележащих уровней (таких, как АТМ) требуют поддержки определенного качества сервиса (QoS), протоколом MAC должно быть предусмотрено выделение определенной части суммарной емкости

радиоканала под конкретные услуги. При транспортировке трафика в нисходящем направлении (от базовой станции к абоненту) существует лишь одна передающая станция, и реализовать поддержку QoS на уровне протокола MAC просто. При транспортировке в восходящем направлении возникает конкуренция за доступ к среде передачи между несколькими абонентскими устройствами, что заметно усложняет протокол MAC.

Над уровнем MAC расположен так называемый уровень конвергенции, функции которого зависят от характера предоставляемого сервиса. На него, в частности, могут быть возложены инкапсуляция кадров, или блоков данных (PDU), более высоких уровней в кадры 802.16 MAC/PHY, преобразование адресов и параметров, определяющих QoS, к формату 802.16, адаптация временных характеристик трафика вышележащих уровней к эквивалентным сервисам MAC-уровня.

В отдельных случаях, например при работе с цифровым аудио- или видеотрафиком, без уровня конвергенции можно обойтись, передав соответствующие потоки на обработку непосредственно транспортному уровню. Однако услуги верхних уровней, использующие структуры PDU, требуют наличия протоколов уровня конвергенции.

Требования, накладываемые спецификациями 802.16 на конкретное оборудование, формулируются в терминах поддерживаемых широкополосных сервисов. Скажем, интерфейс 802.16 должен поддерживать скорости передачи и уровни QoS, предусмотренные в сетях ATM или IP, либо поддерживать пропускную способность и величину задержки, необходимые для передачи голоса или видео.

Специальные требования к широкополосным услугам сформулированы в спецификациях 802.16.1. Здесь предусмотрено три типа услуг: основанные на коммутации каналов, на пакетах переменной длины и на пакетах/ячейках фиксированной длины. Специфика услуг первого типа очевидна из самого названия. Услуги с пакетами переменной длины ориентированы на работу с трафиком IP, frame relay и MPEG-4. Третий тип услуг предусмотрен для

совместимости с сетями АТМ. При описании широкополосных услуг ключевыми параметрами являются поддерживаемая скорость передачи данных, частота ошибок передачи и максимальная задержка однонаправленной передачи.

Данные, передаваемые через радиointерфейс 802.16, представляют собой последовательность кадров MAC. Их не стоит смешивать с кадрами TDMA (Time Division Multiple Access), состоящими из набора временных слотов, каждый из которых выделен определенному абоненту. Временной слот TDMA может содержать в точности один кадр MAC, несколько таких кадров или, напротив, долю кадра. Временные слоты, расположенные в нескольких последовательных кадрах TDMA и относящиеся к данному абоненту, образуют логический канал, по которому передаются MAC-кадры.

Протокол 802.11 MAC ориентирован на установление соединений. Каждый MAC-кадр содержит идентификатор соединения, по которому протокол MAC доставляет данные адресату. Кроме того, предусмотрено взаимно однозначное соответствие между идентификатором соединения и сервисным потоком. Последний определяет параметры QoS (максимальная задержка передачи, нестабильность задержки, минимальная пропускная способность), обмен которыми производится по данному соединению.

Концепция сервисного потока - ключевая с точки зрения функционирования протокола MAC, поскольку именно сервисные потоки являются механизмом контроля за QoS для восходящей и нисходящей передачи. В частности, они используются в процессе выделения базовой станцией долей полосы пропускания отдельным сервисам.

Спецификацией 802.11 PHY предусмотрены различные структуры для нисходящих каналов "точка - много точек" и восходящих каналов "много точек - точка". Так, при передаче в восходящем направлении используется схема множественного доступа с временным уплотнением (TDMA), дополненная алгоритмом выделения полосы пропускания по требованию (Demand Assignment Multiple Access, DAMA). Упомянутый алгоритм

позволяет сети оптимальным образом адаптироваться к постоянно изменяющимся потребностям отдельных клиентов. Комбинация DAMA-TDMA обеспечивает динамическое выделение временных слотов отдельным логическим каналам.

Для передачи трафика в нисходящем направлении предусмотрено два режима: один рассчитан на транспортировку непрерывных потоков (аудио и видео), а другой - трафика переменной интенсивности (IP-пакеты). В первом случае для доступа к логическому каналу используется алгоритм временного мультиплексирования (TDM), а распределение суммарной полосы пропускания между нисходящим и восходящим трафиком осуществляется на основе дуплексного частотного разделения каналов (Frequency Division Duplexing, FDD). Во втором случае применяется описанная выше схема DAMA-TDMA, а для разделения трафика, передаваемого в противоположных направлениях, служат алгоритмы FDD, FSDD (дуплексное частотное разделение со смещением) и TDD (дуплексное временное разделение).

2.3 Развитие стандарта 802.16 и его краткая характеристика

Исходная версия стандарта, принятая в декабре 2001 г., охватывает диапазон частот 10 - 66 ГГц и предусматривает модуляцию на одной несущей частоте (Single Carrier, SC). Однако в январе 2003 г. принято дополнение к стандарту - 802.16a, рассчитанное на оборудование ШБД для городских сетей в диапазоне 2 - 11 ГГц. Помимо модуляции на одной несущей допускается использование более сложного вида модуляции - ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Предполагается, что оборудование 802.16a сможет успешно конкурировать с ADSL- и кабельными модемами. Развертывание таких систем должно обходиться дешевле, поскольку отпадает надобность в проводах.

Новая версия стандарта 802.16 была принята 24 июня 2004 г. Она вбирает в себя все предыдущие версии и опубликована под названием IEEE

802.16 - 2004 г. В процессе разработки находится дополнение - IEEE 802.16e, которое призвано обеспечить оборудование стандарта 802.16 поддержкой мобильных устройств.

Опробованная технология OFDM показала хорошие результаты. Привлекательность новых технологий в том и состоит, что они рассчитаны на использование в условиях плотной городской застройки, то есть внутри мегаполисов и других городов с миллионным населением, вокруг которых наиболее быстро развивается рынок ШБД.

Успех внедрения и коммерческого использования оборудования WiMAX во многом определяется наличием элементной базы - микросхемных наборов или чипсетов. Известные на сегодняшний день поставщики чипсетов для WiMAX - это корпорация Intel и компании Fujitsu и Asiros. Следующее поколение микросхем - так называемые system-on-chip - по сути, представляет собой готовые абонентские устройства стоимостью по 100-200 долл. за штуку.

Стандарт 802.16 регламентирует два уровня - уровень доступа к среде (Media Access Control, MAC) и физический уровень (PHY) - применительно к базовым станциям и абонентским комплексам.

В таблице 8.1 приведены основные технические данные стандарта 802.16 и его расширения 802.16a.

В стандарте особое внимание уделяется планированию пользовательских потоков данных (Service Flow), на которых строится весь информационный обмен между базовой станцией и абонентскими устройствами, а также средствам защиты пользовательских данных (privacy sub layer) и безопасности связи.

	802.16	802.16a
Диапазон	10 - 66 ГГц	2 - 11 ГГц
Условия работы	Только прямая видимость	Возможность работы в не прямой видимости для абонентов ближней зоны
Скорость	32,0 - 134,4 Мбит/с	1,0 - 75,0 Мбит/с
Модуляция	QPSK, 16 QAM, 64 QAM Одна поднесущая	QPSK, 16 QAM, 64 QAM (256 QAM) Одна поднесущая OFDM 256 поднесущих OFDMA 2048 поднесущих
Дуплексный режим	TDD/FDD	TDD/FDD
Полоса частот	20, 25 и 28 МГц	От 1,25 до 20 МГц
Радиус соты	Типичный: 2 - 5 км	Типичный: 4 - 6 км

Передача трафика *от абонентских устройств к базовой станции* (так называемое восходящее направление, uplink) основывается на комбинации двух методов многостанционного доступа: DAMA (доступ по запросу) и TDMA (доступ с временным разделением каналов). Структура пакетов физического уровня поддерживает переменную длину пакета MAC-уровня. Передатчик осуществляет рандомизацию, помехоустойчивое кодирование и модуляцию по алгоритмам QPSK, 16 QAM и 64 QAM (два последних метода модуляции предусмотрены в качестве опции).

Передача трафика *от базовой станции к абонентским устройствам* (так называемое нисходящее направление, downlink) ведется в режиме временного дуплекса (TDD) в едином потоке для всех абонентских устройств одного сектора. Передатчик осуществляет рандомизацию, помехоустойчивое кодирование и модуляцию в соответствии с алгоритмами QPSK, 16 QAM и 64 QAM (последний вариант предусмотрен для базовых станций в качестве опции).

Модуляция. Особенности распространения радиоволн частотного диапазона 10 - 66 ГГц ограничивают возможности работы систем условиями прямой видимости. В типичной городской среде это позволяет подключить примерно половину абонентов, находящихся в пределах рабочей дальности от базовой станции. Для остальных 50% прямой видимости, как правило, нет. В этой связи институт IEEE разработал дополнение к стандарту 802.16, которое относится к частотам 2 - 11 ГГц и, помимо одночастотной передачи (Single Carrier, SC), предусматривает режимы ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) и множественного доступа на основе такого мультиплексирования (OFD Multiple Access, OFDMA).

В режиме OFDM допускается одновременная передача на 256 поднесущих. За счет увеличения (примерно в такое же число раз) длительности элементарного символа можно одновременно принимать прямой и отраженные от препятствий сигналы, либо вообще работать только на отраженных сигналах вне пределов прямой видимости базовой станции.

Безопасность. В стандарте IEEE 802.16 каждый абонентский комплекс подписан цифровым сертификатом X.509, который "защит" производителем оборудования и не может быть изменен даже после окончания срока действия сертификата - 10 лет. На основании цифровой подписи происходит аутентификация абонентского комплекса на базовой станции, при этом базовая и абонентская станции обмениваются зашифрованными ключами и устанавливают безопасное (зашифрованное) соединение. Множество ключей для шифрования и сам алгоритм - 3-DES - обеспечивают сложность расшифровки даже при перехвате. Механизм шифрования трафика работает одновременно с двумя ключами для каждого виртуального соединения, что обеспечивает синхронизацию в среде с возможными потерями пакетов, а перекрывающиеся времена жизни ключей - надежность соединения.

Выводы по главе 2

1. Системы фиксированного широкополосного доступа в настоящее время не воспринимаются в качестве эффективного способа предоставления речевых и видео услуг, а также сервисов высокоскоростной передачи данных домашним и бизнес-пользователям.

2. Под WiMAX понимается технология операторского класса, которая практически не имеет на сегодняшний день альтернативы по предоставлению населению высококачественных услуг мультисервисного широкополосного беспроводного доступа.

3. Успех внедрения и коммерческого использования оборудования WiMAX во многом определяется наличием элементной базы - микросхемных наборов или чипсетов.

Глава 3 Модемы OFDM и многостанционный доступ OFDMA

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

3.1 Принципы построения и особенности модемов OFDM

Режим OFDM – это метод модуляции потока данных в одном частотном канале (шириной 1–2 МГц и более) с центральной частотой f_c . Деление же на каналы, как и в случае SC – частотное. Напомним, что при модуляции данных посредством ортогональных несущих в частотном канале выделяются N поднесущих:

$$f_k = f_c + k\Delta f, \quad (3.1)$$

где: k – целое число из диапазона $[-N/2, N/2]$ (в данном случае $k \neq 0$).

Расстояние между ортогональными несущими.

$$\Delta f = 1/T_b, \quad (3.2)$$

где T_b – длительность передачи данных в символе.

Помимо данных OFDM-символ включает защитный интервал длительностью T_g , так что общая длительность OFDM – символа

$$T_s = T_b + T_g, \quad (3.3)$$

Защитный интервал представляет собой копию окончного фрагмента символа. Его длительность T_g может составлять 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 от T_b .

Каждая поднесущая модулируется независимо посредством квадратурной амплитудной модуляции.

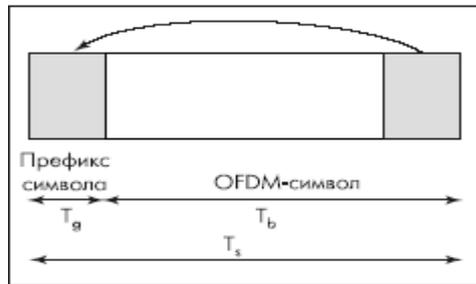


Рис.3.1 OFDM-символ.

Общий сигнал вычисляется методом обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) как комплексное представление удобно, поскольку генерация радиосигнала происходит с помощью квадратурного модулятора в соответствии с выражением

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{i2\pi f_c t} \sum_{k=-N/2}^{N/2} c_k e^{i2\pi \Delta f_k (t-T_0)} \right\} (0 < t < T_0) \quad (3.4)$$

где: c_k - комплексное представление символа квадратной модуляции (QAM – символа).

Для работы алгоритмов БПФ/ОБПФ количество точек должно соответствовать 2^m . Поэтому число несущих выбирают равным минимальному числу $N_{\text{FFT}} = 2^m$, превосходящему N . В режиме OFDM стандарта IEEE 802.16 $N = 200$, соответственно $N_{\text{FFT}} = 256$. Из них 55 ($k = 6128 \dots 6101$ и $101 \dots 127$) образуют защитный интервал на границах частотного диапазона канала. Центральная частота канала и частоты защитных интервалов не используются (т.е. амплитуды соответствующих им сигналов равны нулю). Из остальных 200 несущих 8 частот – пилотные (с индексами $\pm 88, \pm 63, \pm 38, \pm 13$), остальные разбиты на 16 подканалов по 12 несущих в каждом, причем в одном подканале частоты расположены не подряд. Например, подканал 1 составляют несущие с индексами -100, -99, -98, -37, -36, -35, 1, 2, 3, 64, 65, 66. Деление на подканалы необходимо, так как в режиме WirelessMAN-OFDM предусмотрена возможность работы не во всех 16, а в одном, двух, четырех и восьми подканалах – некий прообраз схемы множественного доступа OFDMA. Поэтому каждый подканал и каждая группа подканалов имеют свой индекс (от 0 до 31).

Длительность полезной части T_b OFDM-символа зависит от ширины полосы канала BW и частоты дискретизации F_s ;

$$F_s = NFFT / T_b \quad (3.5)$$

Соотношение $F_s / BW = n$ нормируется, и в зависимости от ширины полосы канала принимает значения 86/75 (BW кратно 1,5 МГц), 144/125 (BW кратно 1,25 МГц), 316/275 (BW кратно 2,75 МГц), 57/50 (BW кратно 2 МГц) и 8/7 (BW кратно 1,75 МГц и во всех остальных случаях). Защитный интервал при OFDM-модуляции – мощное средство борьбы с межсимвольными помехами (межсимвольной интерференции, МСИ), возникающими вследствие неизбежных в городских условиях переотражений и многолучевого распространения сигнала. МСИ приводит к тому, что в приемнике на прямо распространяющийся сигнал накладывается переотраженный сигнал, содержащий предыдущий символ. При модуляции OFDM переотраженный сигнал попадает в защитный интервал и вреда не причиняет. Однако этот механизм не предотвращает внутрисимвольную интерференцию – наложение сигналов с одним и тем же символом, пришедших с фазовой задержкой. В результате информация может полностью исказиться или (например, при фазовом сдвиге на 180°) просто исчезнуть. Для предотвращения потери информации при пропадании отдельных символов или их фрагментов стандарт IEEE 802.16 предусматривает эффективные средства канального кодирования.

Кодирование данных на физическом уровне включает три стадии – рандомизацию, помехозащитное кодирование и перемежение. Рандомизация – это умножение блока данных на псевдослучайную последовательность (ПСП), которую формирует генератор ПСП с задающим полиномом вида $1 + x^{14} + x^{15}$. В нисходящем потоке генератор ПСП инициализируется с началом кадра посредством кодового слова 4A8016. Начиная со второго пакета кадра генератор ПСП инициализируется на основе идентификационного номера базовой станции BSID, идентификатора профиля пакета DIUC (downlink interval usage code) и номера кадра (рис.3.2). В восходящем потоке все

происходит аналогично, с той лишь разницей, что инициализация генератора ПСП происходит с первого пакета (вместо DIUC используется UIUC – uplink interval usage code).



Рис.3.2 – Формирование вектора инициализации генератора ПСП для рандомизации нисходящего потока OFDM

Кодирование данных предполагает каскадный код с двумя стадиями – кодер Рида-Соломона из поля Галуа GF (256) и сверточный кодер. В базовом виде код Рида-Соломона оперирует блоками исходных данных по 239 байт, формируя из них кодированный блок размером 255 байт (добавляя 16 проверочных байт) и способный восстановить до 8 поврежденных байт. Поскольку реально используемые блоки меньше длины K , перед ними добавляются $(239 - K)$ нулевых байт. После кодирования эти байты удаляются. Если необходимо сократить число проверочных слов, для уменьшения число восстанавливаемых байт T , используются только 2 первых проверочных байтов. Обязательные для поддержки в IEEE 802.16 варианты каскадного кода приведены в табл.3.1.

Табл.3.1. Основные режимы в стандарте IEEE 802.16.

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

После кодера Рида-Соломона данные поступают в сверточный кодер с порождающими последовательностями (генераторами кода) $G1 = 171_8$ (для выхода X) и $G2 = 133_8$ (для Y) – так называемый стандартный код NASA. Его базовая скорость кодирования – $1/2$, т.е. из каждого входного бита он формирует пару кодированных бит X и Y. Упуская из последовательности пар элементы X_i или Y_i , можно получать различные скорости кодирования.

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

$$\begin{aligned}
 mk &= (Ncbps / 12) - (k \bmod 12) + \text{floor} (k / 12); \\
 jk &= s - \text{floor} (mk / s) + (mk + Ncbps - \text{floor} (12 mk / Ncbps)) \bmod s, \quad (3.6) \\
 k &= 0 \dots Ncbps - 1,
 \end{aligned}$$

где mk и jk – номер исходного бита после первой и второй стадии перемежения, соответственно;

$Ncbps$ – число кодированных бит в OFDM-символе (при заданном числе субканалов),

s – $1/2$ числа бит на несущую (1 / 2 / 4 / 6 бит для BPSK / QPSK / 166QAM / 646 QAM, соответственно, для BPSK $s=1$).

Функция $\text{floor} (x)$ – это наибольшее целое число, не превосходящее x ; функция $(x \bmod r)$ – остаток от x/r .

Каждой группе ставится в соответствие значения Q и I из векторных диаграмм Грея (рис.3.3), которые затем используются при непосредственной модуляции несущей.

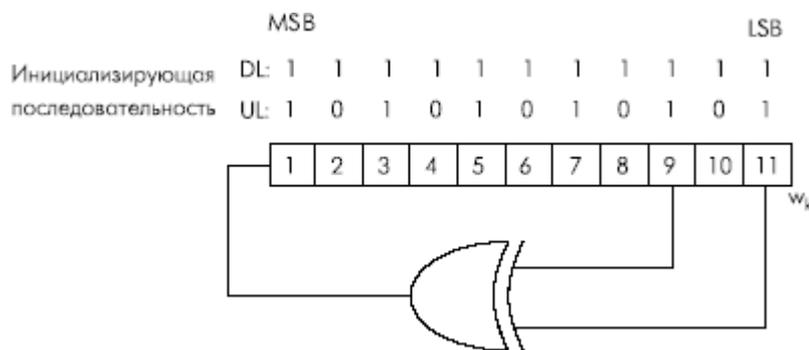


Рис.3.3 Генерация модулирующей последовательности для пилотных несущих.

Пилотные несущие модулируются посредством BPSK.

После определения модуляционных символов посредством ОБПФ вычисляется сам радиосигнал и передается в передатчик. При приеме все процедуры производят в обратном порядке. В режиме OFDM на физическом уровне для сетей с архитектурой "точка-многоточка" кадровая структура передачи принципиально мало чем отличается от режима SC. Так же как и в высокочастотной области, информационный обмен происходит посредством последовательности кадров (фреймов). Каждый фрейм (рис.3.4) делится на два субкадра – нисходящий (DL – от БС к АС) и восходящий (UL – от АС к БС). Разделение на восходящий и нисходящий каналы – как временное (TDD), так и частотное (FDD). В последнем случае DL и UL транслируются одновременно, в разных частотных диапазонах.

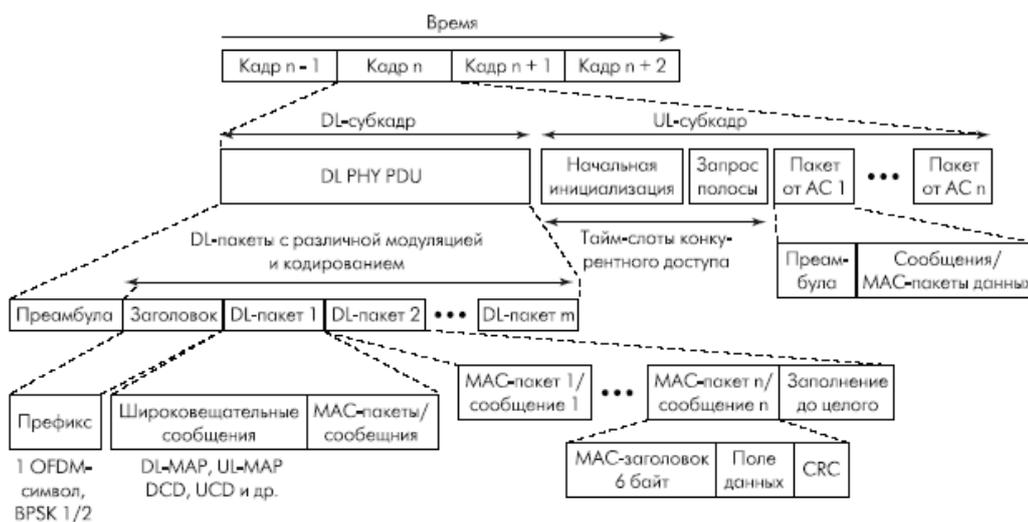


Рис.3.4 Структура OFDM-кадров при временном дуплексировании

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

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

В первый пакет входят широковещательные сообщения (предназначенные всем AC) – карты расположения пакетов DL-MAP, UL-MAP, дескрипторы нисходящего/восходящего каналов DCD/UCD, другая служебная информация. Каждый пакет обладает своим профилем (схема кодирования, модуляция и т.д.) и передается по средством целого числа OFDM-символов. Точки начала и профили всех пакетов, помимо первого, содержатся в DL-MAP.

Нисходящий субкадр содержит интервал конкурентного доступа, включающий периоды для начальной инициализации AC (вхождение в сеть) и для запроса полосы передачи. Далее следуют временные интервалы, назначенные базовой станцией определенным абонентским станциям для передачи. Распределение этих интервалов (точки начала) содержится в сообщении UL-MAP. AC в своем временном интервале начинает трансляцию с передачи короткой преамбулы (один OFDM-символ, использует только четные несущие). За ним следует собственно информационный пакет, сформированный на MAC-уровне.

Длительность OFDM-кадров может составлять 2,5; 4; 5; 8; 10; 12,5; и 20 мс. Заданный базовой станцией, период построения кадров не может изменяться, поскольку в этом случае потребуется ресинхронизация всех AC.

Запрос на установление соединения не отличается от общепринятого в стандарте IEEE 802.16, за исключением дополнительного режима "концентрированного" запроса (Region-Focused). Он предназначен только для станций, способных работать с отдельными субканалами. В этом режиме в интервалах конкурентного доступа (заданных в UL-MAP) АС может передать короткий 46разрядный код на одном из 48 субканалов, каждый из которых включает четыре несущих. Всего предусмотрено восемь кодов. Таблица кодов и подканалов приведена в тексте стандарта IEEE 802.16. Код и номера канала АС выбирает случайным образом.

Получив кодовое сообщение, БС предоставляет АС интервал для передачи "обычного" запроса на предоставление доступа (заголовок запроса МАСбурувня) – если это возможно. Однако в отличие от других механизмов, БС в UL-MAP не указывает идентификатор запросившей ее станции, а приводит номера кода запроса, подканала, а также порядковый номер интервала доступа, в течение которого был передан запрос. По этим параметрам АС и определяет, что интервал для запроса полосы передачи предназначен ей. Выбор момента для передачи 46разрядного кода запроса доступа происходит случайным образом, по описанному выше алгоритму обращения к каналу конкурентного доступа.

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

3.2 MESH - сети

Формально Mesh-сеть – это вид топологии сети IEEE 802.16 в режиме OFDM, и ее физический уровень – это OFDM. Поэтому различия Mesh-сети с уже рассмотренными режимами проявляются не только, да и не столько на физическом уровне. Основное отличие Mesh-сети от рассматриваемой до сих пор архитектуры "точка-многоточка" – в том, что если в последнем случае АС может общаться только с БС, то в Mesh-сети возможно взаимодействие непосредственно между АС. Поскольку сети стандарта IEEE 802.16 ориентированы на работу с широкими частотными каналами, Mesh-сети вошли в стандарт вовсе не с целью создания одноранговых локальных сетей – для этого есть стандарты группы IEEE 802.11. Причина в ином – необходим инструмент построения широкополосной сети, в которой трафик может передаваться по цепочке из нескольких станций, ликвидируя тем самым проблемы передачи при отсутствии прямой видимости. Соответственно и все механизмы управления, позволяют построить децентрализованную распределенную сеть, ориентированы все же на древовидную архитектуру, с выделенной базовой станцией (корневой узел) и доминирующими потоками БС-АС. В Mesh-сети все станции (узлы) формально равноправны. Однако практически всегда обмен трафика Mesh-сети с внешним окружением происходит через один определенный узел (рис.3.5).

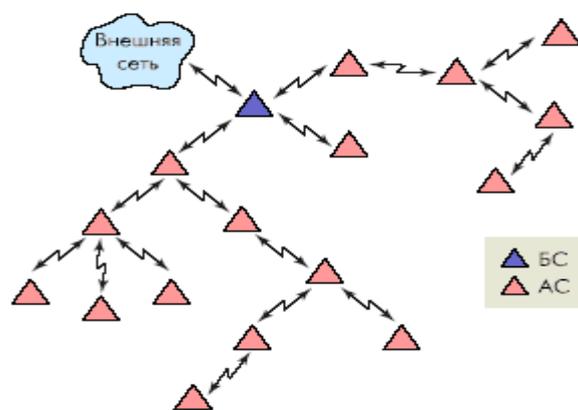


Рис.3.5 Пример Mesh-сети

Такой узел называют базовой станцией Mesh-сети, именно на него возлагается часть необходимых для управления Mesh-сетью функций. При

этом управление доступом может происходить либо на основе механизма распределенного управления, либо централизованным способом, под управлением БС. Возможна и комбинация этих методов.

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

В Mesh-сети нет понятия восходящих/нисходящих каналов. Весь обмен происходит посредством кадров. Станции передают сообщения либо в отведенные им временные интервалы (в соответствии с предшествующим назначением каналов), либо получают доступ к каналам произвольным (случайным) образом. Каждый узел имеет уникальный 486 разрядный MAC-адрес. Кроме того, для идентификации внутри Mesh-сети станциям присваивается 166 разрядный сетевой идентификатор.

Распределение канальных ресурсов в Mesh-сети может быть централизованным и децентрализованным (распределенным). В свою очередь децентрализованное распределение бывает координированным с БС и не координированным. Децентрализованное распределение ресурсов подразумевает, что распределение происходит в пределах одной группы соседей (т.е. между станциями, способными непосредственно связываться друг с другом). При координированном децентрализованном распределении узлы обмениваются между собой специальными сообщениями управления распределением (distributed scheduling – DSCH).

Координированность заключается в том, что период выдачи таких сообщений каждой станцией определен и известен ее соседям. Координированные DSCH-сообщения передаются в субкадрах управления очередностью доступа в оговоренных в сетевом дескрипторе интервалах. Некоординированные DSCH-сообщения передаются в субкадре данных. DSCH-сообщения – это запросы на получение канального ресурса и ответные

сообщения с предоставлением (подтверждением) свободного ресурса (временного интервала в субкадре данных).

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

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

3.3 Особенности применения многостанционного доступа OFDMA

Режим WirelessMAN-OFDMA (далее – OFDMA), как следует из его названия, это метод множественного доступа посредством разделения ортогональных несущих. В отличие от метода WirelessMAN-OFDM, речь идет уже не только о механизме модуляции, но и о способе разделения

каналов. Данный механизм уже достаточно хорошо известен, в частности, он нашел широкое применение в системах цифрового телевидения DVB (наземных, кабельных и спутниковых). Один логический OFDMA-канал образован фиксированным набором несущих, как правило, распределенных по всему доступному диапазону частот физического канала.

С точки зрения формирования модуляционных символов OFDMA аналогичен OFDM: OFDMA-символ включает собственно зону передачи данных и предшествующий ему защитный интервал (повтор начального фрагмента символа), предназначенный для предотвращения межсимвольной интерференции). Сам символ – это совокупность модулированных ортогональных несущих. В режиме OFDMA несущих значительно больше, чем в OFDM – 2048 вместо 256, соответственно и число подканалов становится достаточным для организации работы сети: в разных режимах их от 32 до 70, по 24 или 48 информационных несущих в каждом. Используются не все 2048 несущих – около 200 нижних и 200 верхних частот составляют защитный интервал канала и не модулируются. Также не используется центральная частота канала (частота с индексом 1024). Кроме того, часть несущих – пилотные, предназначенные для служебных целей, а не для передачи информации. Точное число пилотных несущих и частот в защитных интервалах незначительно варьируется в зависимости от режимов OFDMA.

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

Метод формирования, структура OFDM-символов и механизм канального кодирования в OFDMA схожи с OFDM. Канальное кодирование включает рандомизацию, помехоустойчивое кодирование, перемежение и модуляцию. Метод рандомизации практически идентичен OFDM, различны лишь способы формирования инициализирующего вектора генератора псевдослучайной последовательности (ПСП).

Помехоустойчивое кодирование в OFDMA в качестве обязательного предусматривает только сверточный кодер – такой же, как в OFDM, и с тем же набором скоростей кодирования. Кодера Рида-Соломона нет. Опционально предусмотрено применение блоковых и сверточных турбокодов. Метод перемежения также практически идентичен.

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

За преамбулой следуют два символа, передающие заголовок кадра FCH и карту распределения полей нисходящего канала DL-MAP. Заголовок транслируется посредством QPSK со скоростью кодирования 1/2. Он содержит префикс нисходящего канала (DL Frame prefix), в котором указываются используемые сегменты и параметры карты нисходящего канала DL-MAP (длина, используемый метод кодирования и число повторений), транслируемой сразу за заголовком кадра. Также в заголовке используется флаг, установка которого означает изменение в расположении области конкурентного доступа в восходящем субкадре по отношению к предыдущему кадру.

Далее транслируется карта восходящего канала UL-MAP и нисходящие пакеты данных для разных АС.

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

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

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

$$\text{subcarrier}(k, s) = N_{\text{subchannels}} n_k + \{P[(s + n_k) \bmod N_{\text{subchannels}}] + \text{IDcell}\} \bmod N_{\text{subchannels}}, \quad (3.1)$$

где $\text{subcarrier}(k, s)$ – индекс несущей k в подканале s , $s = [0 \dots N_{\text{subchannels}} - 1]$,

$$k = [0 \dots N_{\text{subcarriers}} - 1],$$

$$n_k = (k + 13s) \bmod N_{\text{subcarriers}}. \text{IDCell}$$

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

Очевидно, что перед применением приведенной формулы информационные несущие должны быть перенумерованы так, чтобы их

индексы укладывались в диапазон 0–1535 (последнее значение соответствует физическому индексу 1702), т.е. пронумерованы подряд, без учета пилотных частот. Поскольку в четных и нечетных символах расположение пилотных частот различно, распределение информационных несущих для них также нужно вычислять независимо.

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

Символ в режиме PUSC формируется по следующему принципу. Всего предусмотрено 2048 частот, из них центральная (с индексом 1024) и защитные (184 нижних и 183 верхних) не используются. Оставшиеся 1680 несущих последовательно разбивают на 120 кластеров, каждый содержит 14 несущих. После этого последовательные физические кластеры перенумеровываются в "логические" в соответствии с формулой $LogicalCluster = RenumberingSequence [(PhysicalCluster + 13 \cdot ID_{cell}) \bmod 120]$, где $RenumberingSequence(x)$ – соответствующий элемент приведенной в стандарте IEEE 802.16 последовательности перестановок, ID_{cell} – определяемый на MAC-уровне идентификатор отдельного сегмента БС (задаваемая базовой станцией целая переменная в диапазоне 0–31). Эта операция фактически означает перемежение – распределение последовательных групп несущих по всему диапазону физического канала. Далее логические кластеры разбиваются на шесть групп (0–23, 24–39, 40–63, 64–79, 80–103, 104–119), по 24 и 16 кластеров. Большие группы соответствуют большим сегментам (по умолчанию, группа 0 соответствует

сегменту 0, группа 2 – сегменту 1, группа 4 – сегменту 2). В каждом кластере определяются пилотные несущие – для четных символов это 5-я и 9-я несущие, для нечетных – 1-я и 13-я (рис.3.6).

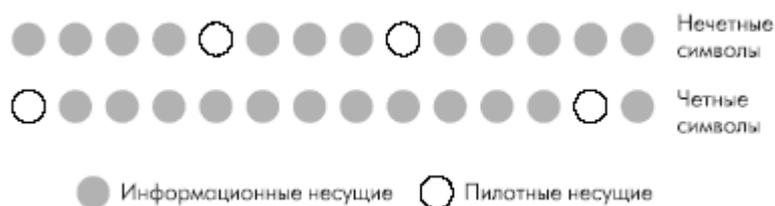


Рис.3.6 Структура кластера

Таким образом, набору подканалов в пределах сегмента или нескольких сегментов оказывается поставленным в соответствие набор несущих (для 12 подканалов – 336 несущих, из них 24 пилотные и 288 информационных). Информационные несущие в сегменте нумеруются подряд, не учитывая пилотные частоты, после чего в соответствии с формулой (3.1) каждому подканалу назначаются по 24 несущих. В данном случае в формуле (3.1) используются значения $N_{subchannels} = 12$ или 8, $N_{subcarriers} = 24$, а также специальные перестановочные последовательности P12 и P8 для сегментов из 12 и 8 каналов.

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

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

Фрагмент представляет собой совокупность трех символов и четырех несущих, в котором положения пилотных частот жестко определены (рисунок 15).

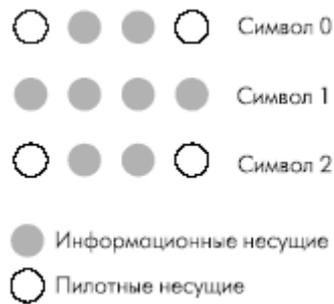


Рис.3.7 Структура “фрагмента” восходящего канала.

Весь частотный диапазон канала (1680 несущих) разбивается на 420 последовательных фрагментов, по 4 несущих в каждом. Предусмотрено 70 подканалов. Каждый из них включает 6 фрагментов – т.е. 24 несущие на символ в одном подканале. Распределение фрагментов по подканалам происходит следующим образом. Все 420 фрагментов разбиваются на 6 групп по 70 фрагментов. В каждый подканал включается по одному фрагменту из каждой группы в соответствии с уравнением:

$$\text{Tile}(n, s) = 70n + \{P[(n + s) \bmod 70] + \text{UL_IDcell}\} \bmod 70, \quad (3.2)$$

где $\text{Tile}(n, s)$ – фрагмент n подканала s , $n = [0 \dots 5]$, $s = [0 \dots 69]$.

$P(x)$ – перестановочная последовательность,

UL_IDcell – переменная в диапазоне 0–69, задаваемая БС на MAC-уровне.

В результате каждому подканалу в каждом символе назначается свой набор несущих.

После распределения по подканалам происходит нумерация информационных несущих в каждом слоте – всего их в трех символах 48. Информационные частоты в подканале нумеруются начиная с наименьшей несущей фрагмента с наименьшим индексом – сначала в первом символе, затем во втором и третьем. Затем информационные несущие в каждом слоте перенумеровываются в соответствии с формулой:

$$\text{subcarrier}(n, s) = (n + 13s) \bmod 48, \quad (3.3)$$

где s – номер подканала, $n = [0 \dots 47]$ (т.е. происходит циклический сдвиг нумерации информационных несущих на $13s$ в каждом подканале s).

Отметим, что в тексте документа IEEE 802.16 происходит подмена терминов: подканалом в восходящем субкадре авторы текста IEEE 802.16 называют именно слот, информационную структуру размером 24 несущих на 3 символа. И когда в документе написано, что в субканале 48 информационных несущих, следует помнить, что с точки зрения правильной терминологии речь идет не о субканале, а о слоте. Реальных несущих (т.е. физических частот) в субканале всего 24. Умножая их на 3 (число OFDMA-символов в слоте) и вычитая 24 пилотные несущие, как раз и получим 48 информационных несущих.

Опционально в восходящем канале предусмотрен режим, в котором во фрагменте одна пилотная частота (рис.3.8), 6 фрагментов на подканал, всего 96 подканалов (1728 используемых частот).



Рис.3.8 Структура “фрагмента” восходящего канала
в опциональном режиме

Механизмы запроса начальной инициализации в сети и первичного запроса полосы пропускания в режиме OFDMA схожи – и принципиально отличаются от других режимов. Для этих запросов в OFDMA используется специально выделенный канал. Он назначается БС и состоит из шести последовательных подканалов, индексы которых приведены в UL-MAP. Запрос представляет собой 144-разрядный CDMA-код, передаваемый посредством BPSK, т.е. 1 бит на несущую в одном символе. В результате для передачи такого кода достаточно 6 подканалов (24 информационных несущих в каждом). Сам код формируется в генераторе ПСП – 15-разрядном сдвиговом регистре с задающим полиномом $1 + X^1 + X^4 + X^7 + X^{15}$. Старшие 6 разрядов вектора инициализации генератора ПСП равны

переменной UL_IDcell, остальные 9 – константа. Номер кода определяется начальной точкой (т.е. числом тактов генератора ПСП после инициализации) – всего предусмотрено 256 кодов. Причем БС использует только часть из всех возможных кодов – сначала N кодов начальной инициализации, за ними следуют M кодов периодического определения параметров АС, далее L кодов запроса полосы. Для каждой БС задается точка начала этой последовательности (N + M + L).

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

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

Первичный запрос полосы в методе OFDMA может происходить двумя способами: посредством заголовков запроса полосы, как и в остальных

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

3.4 Поддержка адаптивных антенных систем

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

Поддержка ASS в спецификации IEEE 802.16 означает модификацию протоколов на физическом и MAC-уровнях, наличие специальных

управляющих и контролирующих сообщений для работы с адаптивными антеннами.

Стандарт допускает в рамках одного кадра транслировать как ненаправленный, так и направленный (посредством AAS) трафик (рис.3.9).

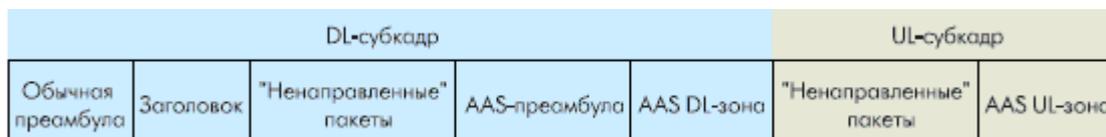


Рис.3.9 – Структура кадров с зоной AAS.

Для разграничения зон не-AAS и AAS-трафика используются специальные сообщения. Принцип применения AAS в режимах OFDM и OFDMA (равно как и в SCa) достаточно схож. Наиболее полно он описан в стандарте для случая OFDMA, поэтому остановимся именно на нем.

Механизм Diversity-Map Scan. В режиме OFDMA предусмотрено два метода работы с AAS – с распределенными несущими в подканале (FUSC, PUSC) и с последовательными несущими (AMC). Каждый из методов в начале AAS-зоны предусматривает передачу OFDMA-символа преамбулы AAS-зоны и заголовка с префиксом AAS-зоны. Для передачи этих сообщений в AAS-зоне нисходящего субкадра выделены специальные подканалы (два старших для FUSC/PUSC и четвертый с начала и четвертый с конца подканалы в AMC). Сообщения в этих подканалах могут повторяться несколько раз – с тем, что если используется не широкопередаточная трансляция, а передача с переключением лучей, сообщения с префиксом дошли бы до всех AC. В префиксе указывается код луча антенны, тип и размеры преамбулы AAS-зоны (в восходящем и нисходящем каналах), область для начальной инициализации / запросов полосы, а также области в кадре для каждого AAS-соединения. Префикс, как и в штатном режиме, передается посредством QPSK со скоростью кодирования 1/2 и двухкратным повтором (в пределах одного символа). Основное назначение префикса – сообщить AC о том, как будут переданы карты DL/UL-каналов для разделенных по направлениям лучей групп пользователей (очевидно, что

распределение канальных ресурсов может происходить независимо в каждом луче).

Для работы в режиме AMC-AAS кадры могут объединяться в суперкадр длительностью не менее 20 обычных кадров. В суперкадр входит по крайней мере один широковещательный кадр, содержащий дескрипторы и карты DL/UL-каналов. Смысл такого объединения – обеспечить минимум управляющих сообщений для группы кадров.

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

Метод Direct Signaling использует механизм последовательного распределения несущих AMC. Его особенность – в каждом кадре в AAS-зоне выделяется от одного до четырех каналов доступа /распределения ресурсов (BWAA – bandwidth allocation/access). Каждый BWAA-канал состоит из двух субканалов, расположенных в верхней и нижней частях диапазона симметрично относительно центральной частоты (если BWAA-канал один, то он включает самый верхний и самый нижний подканалы). В этом канале передаются префикс нисходящего субкадра (для режима Direct Signaling Method), карты UL-MAP и DL-MAP для каждой из пространственно разделенных AC или групп AC. Благодаря точной пространственной настройке AAS данный метод позволяет в одном кадре передавать сообщения множеству пользователей.

В методе прямой сигнализации предусмотрены четыре специальных кодовых сообщения – обучения обратного соединения RLT (reverse link training), доступа в обратном соединении RLA (reverse link access), обучения прямого соединения FLT (forward link training) и инициирования прямого соединения FLI (forward link initiation). Первые два сообщения использует AC, вторые два – БС. Для начальной инициализации или запроса полосы AC

посылает сообщение RLA в канале BWAA. Оно предшествует сообщениям запроса полосы или начального доступа и используется БС для точной настройки своей антенной системы на данную АС. В ответ БС передает сообщение FLI – уникальный код для каждой АС (БС может сама инициировать соединение, пошлав FLI). FLI транслируется в подканале, выделенном для данной АС. Каждая абонентская станция сканирует все подканалы и, обнаружив по кодовой последовательности адресованное ей сообщение начальной инициализации, отправляет в ответ в том же самом канале (в отведенном для нее временном интервале) последовательность RLT, предназначенную для точной настройки антенн БС на АС в данном подканале. В результате, выполнив все необходимые подстройки, БС и АС устанавливают соединение, в течение которого происходит обмен данными. Причем пакетам данных предшествуют тренировочные последовательности FLT (со стороны БС) и RLT (со стороны АС).

Выводы по главе 3

1. На физическом уровне стандарт IEEE 802.16 предусматривает три принципиально различных метода передачи данных: метод модуляции одной несущей, метод модуляции посредством ортогональных несущих OFDM и метод мультиплексирования (множественного доступа) посредством ортогональных несущих OFDMA.

2. Mesh-сети позволяют построение широкополосной сети, в которой трафик может передаваться по цепочке из нескольких станций, ликвидируя тем самым проблемы передачи при отсутствии прямой видимости.

Глава 4 Архитектура сетей мобильного WiMAX и предоставляемые услуги

4.1 Поддерживаемая мобильность в сети WiMAX

Сети WiMAX предназначены для предоставления сервисов как неподвижным, так и подвижным пользователям. WiMAX поддерживает следующие виды мобильности:

1) фиксированный (fixed). В этом случае с оператором согласовывается положение пользователя, в котором он получает обслуживание, например, конкретная сота. Для этого хорошо подходят пользовательские терминалы с закрепленной снаружи здания антенной, направленной на базовую станцию.

2) блуждающий (nomadic), т.е. с изменяемым местоположением. Пользователь имеет возможность подключиться к сети оператора из любого места, где оператор предоставляет покрытие. В течение одной сессии пользователь должен быть неподвижен.

3) передвижной (portable). Пользователь имеет возможность передвигаться со скоростью до 5 км/ч без потери установленной сессии, в том числе (опциональная возможность сети) переходить из одной соты в другую (handover). Во время handover допускаются перерывы в передаче данных (вплоть до значения, максимального для обслуживания текущей TSP/IP сессии), до 2 с. Допускаются потери данных во время handover, заданное качество обслуживания, а QoS восстанавливается только после завершения handover.

4) ограниченная мобильность (simple mobility). Пользователь может передвигаться, в том числе переходить из соты в соту, со скоростью до 60 км/ч без ухудшения качества обслуживания, и до 120 км/ч с допусаемым постепенным ухудшением качества обслуживания. Для приложений нереального (non-real time) времени (работа с e-mail, с Интернет, просмотр видео с буферизацией данных, передача файлов по FTP, IPsec/VPN) качество

обслуживания гарантируется. Время handover не должно превышать 1 с при переключении между IP подсетями и 150 мс в пределах одной подсети, время прерывания передачи данных не превышает 150 мс. Обязательна поддержка ждущего (idle), спящего (sleeping) режимов работы пользовательских терминалов, а также вызовов пользователя (paging), см. соответствующие разделы.

5) полная мобильность (full mobility). Пользователь может передвигаться, в том числе переходить из соты в соту, со скоростью до 120 км/ч без ухудшения качества обслуживания. Гарантируется качество обслуживания для приложений реального времени (VoIP, видео-телефония, просмотр видео без буферизации) и нереального времени (см. ограниченная мобильность). Время handover не превышает 50 мс, время прерывания передачи данных не более 5 мс (или не более длительности одного кадра).

4.2 Варианты построения сетей WiMAX

Существуют следующие принципы построения сетей WiMAX (Release 1 version 4):

- 1) WiMAX основан на стандарте 802.16;
- 2) архитектура сети WiMAX включает в себя 2 глобальные части: ASN - подсеть доступа, CSN - подсеть, обеспечивающая подключение к сетям IP, см. далее. Поддержка стандарта 802.16 полностью реализована в ASN. Обычно подсеть CSN владеет провайдер IP услуг, NSP - Network Server Provider, подсеть ASN - провайдер радиодоступа, NAP - Network Access Provider. NSP и NAP могут являться одним провайдером;
- 3) одна подсеть доступа, ASN, может использоваться несколькими провайдерами услуг (NSP), т.е. к одному ASN могут быть подключены несколько CSN, а также один провайдер IP услуг, NSP, может использовать несколько разных подсетей доступа, т.е. к одному CSN может быть подключено несколько ASN;

- 4) в архитектуре определены стандартные интерфейсы (опорные точки, Reference Points), см. далее, в частности между MS, ASN, CSN для обеспечения работоспособности при использовании оборудования разных производителей;
- 5) сеть должна поддерживать мобильную телефонию на основе VoIP, мультимедийные услуги, а также обязательные функции, определяемые регулятором, такие как экстренный вызов, легальное прослушивание и т.д;
- 6) сеть должна предоставлять пользователю услуги в соответствии с согласованным уровнем сервиса (SLA), поддерживать, если требуется, одновременно несколько голосовых сессий для одного пользователя, одновременную передачу голоса и данных, приоритезацию экстренных вызовов;
- 7) сеть должна быть способна взаимодействовать с шлюзами, обеспечивающими существующие услуги, основанные на IP: SMS over IP, MMS, WAP и другие;
- 8) сеть должна поддерживать широковещательные (broadcast) и многоабонентские (multicast) услуги;
- 9) сеть должна поддерживать взаимную аутентификацию MS и сети, как определено в стандарте 802.16;
- 10) сеть должна поддерживать аутентификацию пользователя с помощью логина/пароля, SIM, USIM, RUIM;
- 11) сеть должна поддерживать конфиденциальность (confidentiality) и целостность (integrity) передаваемых данных с помощью функций, реализованных в ASN;
- 12) сеть должна поддерживать установление/удаление VPN (Virtual Private Network), инициированное MS;
- 13) сеть не должна препятствовать переключению (handover) мультистандартной MS на сеть другой технологии — Wi-Fi, 3GPP, 3GPP2, DSL;
- 14) сеть должна поддерживать мобильность IPv4 или IPv6;

- 15) сеть не должна препятствовать роумингу между провайдерами услуг (NSP). Сеть должна позволять провайдеру доступа (NAP) обслуживать MS, использующие различные доменные имена, (обслуживаемые разными провайдерами услуг);
- 16) сеть должна поддерживать бесшовный handover при скоростях движения транспорта;
- 17) сеть должна поддерживать разные уровни качества обслуживания QoS;
- 18) сеть должна поддерживать взаимодействие с другими беспроводными (3GPP, 3GPP2) или проводными (DSL) сетями. Интерфейс, используемый для такого взаимодействия, должен быть основан на протоколах IETF и IEEE;
- 19) сеть должна поддерживать роуминг с другими операторами WiMAX;
- 20) сеть должна поддерживать изменение параметров и обновление ПО абонентских устройств через радиointерфейс Over-the-Air (OTA) ;
- 21) архитектура сети должна обеспечивать взаимную работоспособность устройств разных производителей - внутри ASN (BS и транспортной сетью), между разными ASN, а также разными элементами ASN и CSN;
- 22) архитектура сети должна поддерживать следующие виды CS (из перечня CS, определенного в 802.16).

Укрупнено WiMAX сеть состоит из следующих логических объектов:

- 1) SS (Subscriber Station) ;
- 2) ASN (Access Service Network) ;
- 3) CSN (Connectivity Service Network).

Каждый объект может быть реализован в одном физическом модуле (например, SS) или в нескольких (ASN, CSN).

Несколько CSN могут быть подключены к одному ASN, и наоборот; несколько ASN могут быть подключены к одному CSN. ASN и CSN могут принадлежать одному оператору или разным.

Архитектура сети, согласно WiMAX, показана на рис.4.1, а компоненты сети на рис.4.2.

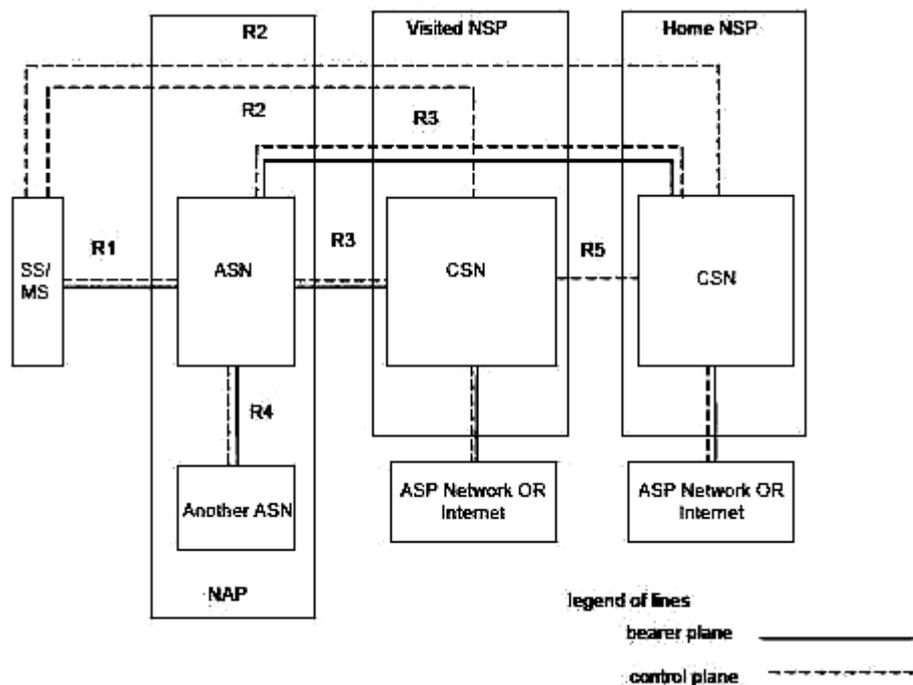


Рис.4.1 Архитектура сети WiMAX.

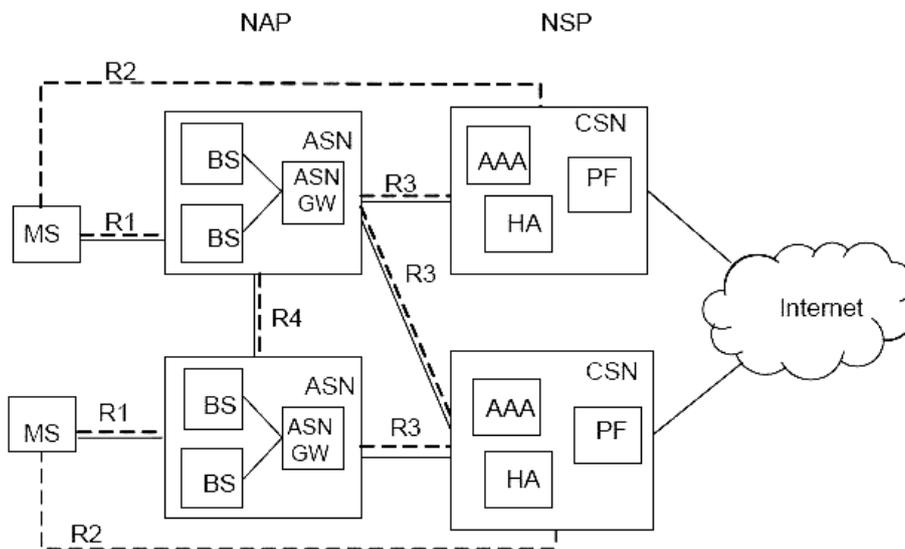


Рис.4.2 Компоненты архитектура сети WiMAX.

Оператор может владеть WiMAX сетью полностью или частично. Оператор, предоставляющий радиодоступ, называется NAP — Network Access Provider. Ему может принадлежать один или несколько ASN. Оператор, предоставляющий сервисы сети (доступ в Интернет, передачу голоса, доступ к определенному контенту) называется NSP — Network Service Provider, ему могут принадлежать один или несколько CSN.

Более детальная архитектура сети показана на рис.4.3.

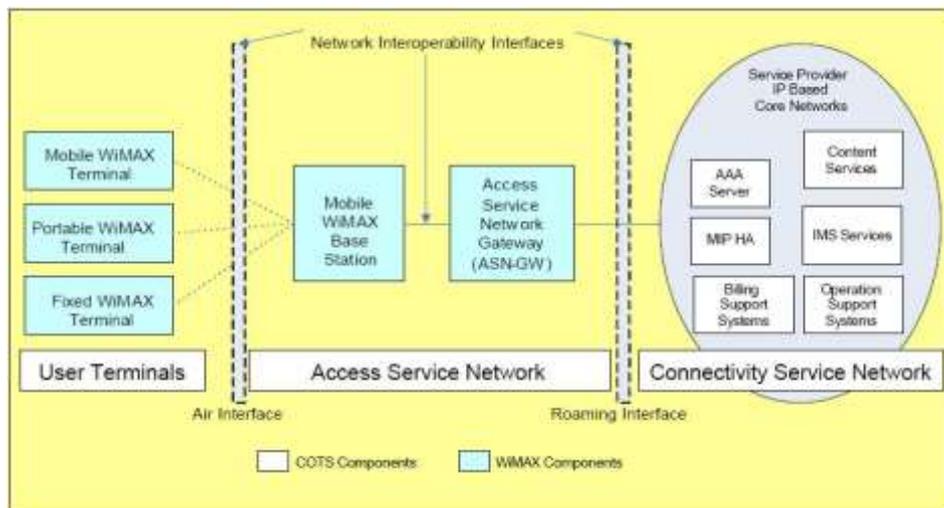


Рис.4.3 Элементы сети WiMAX

User terminal или Mobile Station, MS, или Subscriber Station, SS - устройство, обеспечивающее соединение между оборудованием пользователя (например, компьютером) и сетью. MS может представлять собой CPE, Customer Premises Equipment, обеспечивающее подключение к сети нескольких компьютеров.

Base Station, BS, базовая станция - логический элемент сети, выполняющий обработку физического и MAC уровней по стандарту 802.16. BS представляет один сектор с одной частотой. BS может подключаться к нескольким ASN GW для обеспечения резервирования и/или балансировки нагрузки. Одно физическое изделие может включать в себя несколько BS (логических объектов).

ASN-GW, шлюз радиоподсети - логический элемент сети, выполняющий агрегирование (объединение) сигнальных функций, а также, если необходимо, маршрутизацию потоков данных пользователей. ASN-GW может быть связан с другими ASN-GW для обеспечения резервирования и балансировки нагрузки.

AAA server, Authentication, Authorisation, Accounting, - устройство (сервер), выполняющий процедуры:

- аутентификации пользователя, т.е. проверки его подлинности и

- возможности доступа в сеть;
- авторизации - выделение ему ресурсов сети в соответствии с услугами, на которые он подписан;
- аккаунта - подсчет потребленных пользователем ресурсов (количество времени или размер переданных данных) для формирования счета за пользование сетью.

MIP HA - Mobile IP Home Agent. Применяется для поддержки мобильности, заанкерной в CSN, см. гл. «Обеспечение мобильности». Он же обычно является edge-роутером - роутером-шлюзом, расположенном на границе WiMAX сети и внешних сетей.

IMS, Content services, Billing Support System (BSS), Operator Support System (OSS) - стандартные системы, не являющиеся специфичными для WiMAX, предоставляют вспомогательные функции оператору.

Роуминг - это возможность предоставления абоненту сервисов при его нахождении в чужой сети (в visited network). Абонент может пользоваться теми услугами, которые определены соглашением между домашней (home network) и чужой сетью. Основным достоинством роуминга является большая зона предоставления услуг при наличии единого счета на оплату.

Основные характеристики SI3000 Light ASN:

- инфраструктура с наименьшими затратами, базирующаяся на коммерческих маршрутизаторах;
- доступны услуги мобильной связи;
- доступны услуги стационарной связи;
- совместимость с будущими решениями служит гарантией защиты Инвестиций;
- взаимодействие SI3000 ASN-GW.

4.3 Архитектура сети WiMAX с усовершенствованными функциями

Для достижения более высокого энергетического потенциала линий связи (link budget), уменьшения затухания сигналов и лучшего покрытия микро-спотов (micro-spot), могут быть использованы различные технологии разнесения. Вариант построения такой сети приведен на рис.4.4.

Прибыльная бизнес-модель WiMAX с более высоким покрытием и удовлетворенностью пользователей, а также улучшающая энергетические потенциалы линий связи (link budget) WiMAX может быть достигнута при использовании передовых антенных технологий (MIMO и AAS). Эффект MIMO A/B заключается в ее способности переключаться между MIMO A и MIMO B.

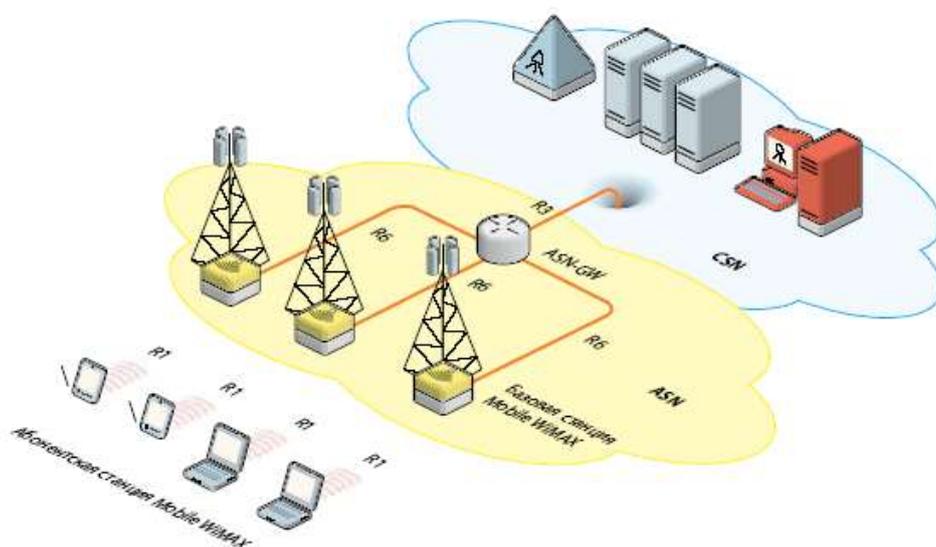


Рис.4.4 Сеть WiMAX с усовершенствованными функциями

Прибыльная бизнес-модель WiMAX с более высоким покрытием и удовлетворенностью пользователей, а также улучшающая энергетические потенциалы линий связи (link budget) WiMAX может быть достигнута при использовании передовых антенных технологий (MIMO и AAS). Эффект MIMO A/B заключается в ее способности переключаться между MIMO A и MIMO B.

Вариант MIMO A с одной принимающей антенной известен также как режим STC (Space Time Coding – прием с пространственно-временным кодированием) и особенно пригоден в условиях NLOS.

AAS - адаптивные антенные системы. В AAS используется несколько антенн для динамического формирования направленного луча. Этот луч контролируется базовой станцией (BS) для направления его к абонентской станции (SS), с которой она (BS) осуществляет коммуникацию. Системы AAS особенно годятся для использования в сценариях с ограниченными интерференциями и могут обеспечить значительные выгоды в среде с прямой видимостью (LOS). Системы Iskratel по умолчанию поддерживают MIMO A/B & STC, а системы AAS будут добавляться там, где это будет технически и коммерчески выгодно.

Решением SI3000 Light ASN предусматривается простой сетевой дизайн и использование «commodity» элементов (т.е. однородных элементов, элементов массовой продукции с одинаковыми свойствами) для установления мобильных соединений на сети провайдера услуг. Результатом этого является наличие механизма хэндовера и продолжения IP-сеанса, обеспечивающего хэндовер не в реальном масштабе времени для фиксированной WiMAX сети и хэндовер операторского класса для мобильной WiMAX сети. Решение SI3000 Light ASN поддерживает также стандартные сетевые элементы, находящиеся за пределами ASN. Помимо этого, возможна миграция типа SI3000 ASN – GW Mobile WiMAX. Когда рынок и технология пересекутся, можно предложить полную поддержку роуминга и взаимодействия с широким диапазоном приложений CSN.

Развернутая сеть WiMAX приведена на рис.4.5.

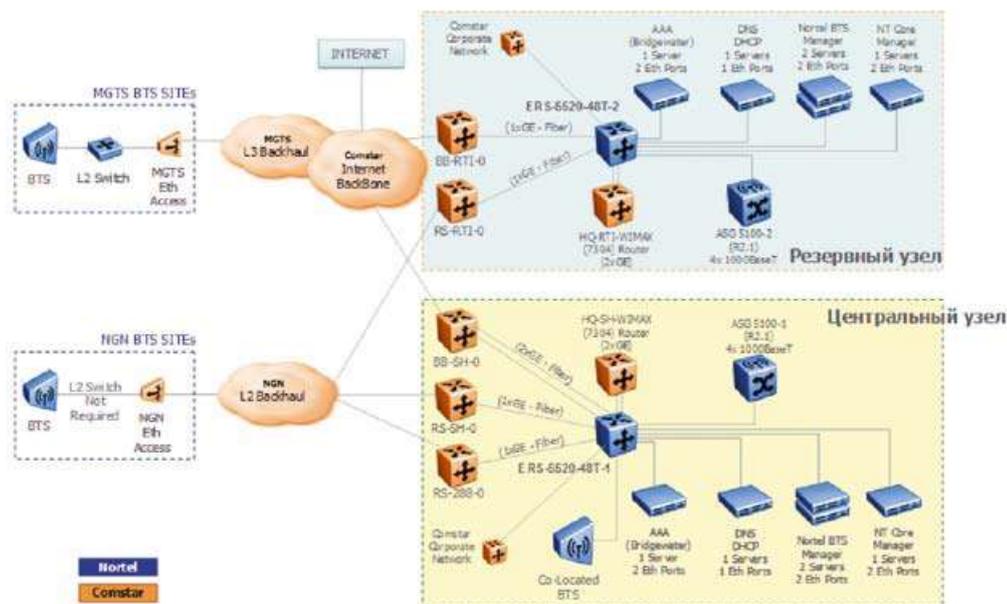


Рис.4.5 Структура развернутой сети WiMAX

Light ASN от Iskratel можете предложить:

- мобильные услуги со значительно меньшими затратами на инфраструктуру;
- SI3000 Light ASN – новая сетевая архитектура;
- в решении SI3000 Light ASN используется новая сетевая архитектура (New Network Architecture), представляющая собой уникальную структуру, позволяющую использовать недорогие и однородные (commoditized) сетевые элементы для создания управляемых, мобильных, насыщенных мультимедийными услугами сетей.

Новая сетевая архитектура SI3000 Light ASN, основанная на простой иерархии со сконфигурированными однородными (commodity) сетевыми элементами, обеспечивает структуру соединения между базовой сетью CSN и радиосетью WiMAX (рис.4.6).

Преимущества новой сетевой архитектуры:

- уникальная и новаторская архитектура;
- развертывание однородных (commodity) элементов (коммутатор, маршрутизатор) с небольшими затратами;
- достаточен WiMAX SS/SSM;
- отсутствие MobileIP стека на SSM;

- «подрывное» воздействие (disruptive impact);
- обеспечивается механизм хэндовера и продолжения IP-сеанса;
- обеспечивает возможность управления QoS для доставки услуг Triple Play.

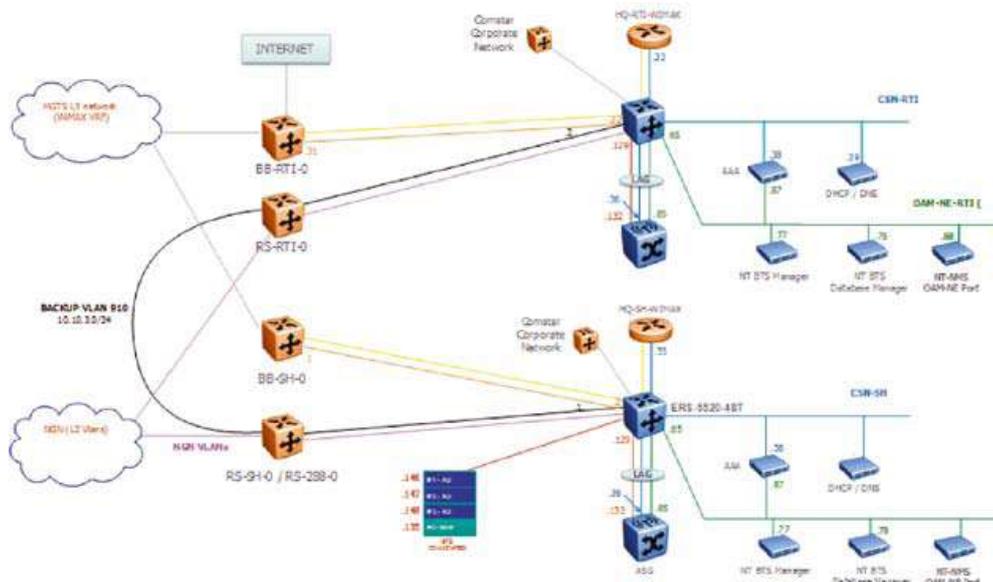


Рис.4.6 Сетевая архитектура SI3000 Light ASN

Выводы по главе 4

1. Сети WiMAX предназначены для предоставления сервисов неподвижным и подвижным пользователям, путем поддержания различных видов мобильности.

2. Сеть WiMAX укрупненно состоит из трех логических объектов, которые могут быть реализованы в одном физическом модуле.

3. Для достижения более высокого энергетического потенциала линий связи, уменьшения затухания сигналов и лучшего покрытия микро-спотов, используются различные технологии разнесения.

Глава 5 Разработка сети WiMAX для широкополосного доступа в интернет

5.1 Выбор и расчет основных характеристик радиointерфейса

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.

При выборе оборудования WiMAX кроме его технических характеристик и цены важное и зачастую определяющее значение представляет такой фактор, как трудности оформления 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.

Очевидно, что 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.

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 и иметь возможность получения разрешения на использование частот в соответствующем диапазоне.

Система должна обладать приемлемой стоимостью, причем в первую очередь важна минимальная стоимость абонентского оборудования.

Принцип действия Mobile WiMAX идентичен сетям сотовой связи: несколько рядом расположенных базовых станций Mobile WiMAX образуют соту, соты объединяются между собой и обеспечивают непрерывное покрытие целого города. Оборудование Mobile WiMAX обеспечивает большую скорость передачи данных, по сравнению с сотовыми сетями, и сравнима со скоростью доступа в проводных сетях. Основные характеристики WiMAX устройства:

Технические характеристики WiMax:

- дальность действия: до 50 км;
- максимальная скорость передачи данных: до 70 Мбит/с на сектор одной базовой станции;
- рабочая частота: 2-11 ГГц;
- спектральная эффективность: до 5 бит/сек/Гц;
- покрытие: расширенные возможности работы вне прямой видимости значительно улучшают качество покрытия обслуживаемой зоны;
- скорость доступа в интернет в пределах сектора базовой станции на

- клиентских устройствах – до 10 Мбит/с;
- зона действия одного сектора базовой станции в условиях плотной застройки – от 800 до 1500 метров;
- мобильность: мгновенное переключение клиентского Mobile WiMAX оборудования между базовыми станциями на скорости движения до 120 км/ч.

Расчет общего число частотных каналов, необходимых для развертывания сотовой сети связи в данной местности, определяется по формуле

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (5.1)$$

$$N_k = \text{int}\left(\frac{2,4 \cdot 10^6}{1500}\right) = 128.$$

где $\text{int}(x)$ – целая часть числа x ;

F_k – полоса частот, занятая одним частотным каналом системы (частотный разнос между каналами).

Для определения необходимой размерности кластера C при заданных значениях ρ_0 и ρ_t используем соотношение

$$p(C) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx \right] \cdot 100, \quad (5.2)$$

где $p(C)$ – процент времени, в течение которого соотношения мощность сигнала/ мощность помехи на входе приемника MS будет находиться ниже защитного отношения ρ_0 .

Интеграл представляет собой табулированную Q-функцию:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx. \quad (5.3)$$

Нижний предел этого интервала имеет вид:

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/\beta_e) - \rho_0}{\alpha_p}, \quad (5.4)$$

где ρ_0 и α_p выражены в дБ;

β_e – определяется соотношением

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^M \beta_i \right) \exp \left[\frac{\gamma^2 (\alpha^2 - \alpha_e^2)}{2} \right]. \quad (5.5)$$

В свою очередь значения α_p и α_e определяются по формулам

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_e^2, \quad (5.6)$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^M \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^M \beta_i \right)^2} \right\}, \quad (5.7)$$

α – параметр, который определяет диапазон случайных флуктуаций уровня сигнала в точке приема:

$$\gamma = 0,1 \ln 10. \quad (5.8)$$

Коэффициент β_i в (5.7) представляет собой медианное значение затухания радиоволн на i -му направлении увеличении помехи. Эти коэффициенты обратно пропорциональны четверти ступени расстояния до источника помехи. Величина M обозначает число базовых станций, которые «мешают», расположенных в соседних кластерах.

Сначала рассмотрим случай, для всенаправленной антенны, где

$$\varphi = 360^\circ, N_S = 1, M = 6 \text{ и } \beta_1 = \beta_2 = (q-1)^{-4}, \beta_3 = \beta_4 = q^{-4}, \beta_5 = \beta_6 = (q+1)^4.$$

где N_S - число секторов.

Выберем значение $C=3$.

$$\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23. \quad q = \sqrt{3 \cdot C}, \quad q = \sqrt{3 \cdot 3} = 3. \quad (5.9)$$

Определим α_e^2

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(0,23^2 \cdot 5^2\right) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 \beta_i\right)^2} \right\} = 16,364 \text{ дБ.}$$

Вычислив квадратный корень, из получившегося значение получаем

$$\alpha_e = \sqrt{16,364} = 4,045 \text{ дБ.}$$

Отсюда следует

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,045^2} = 6,431 \text{ дБ.}$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^6 \beta_i \right) \exp \left[\frac{0,23^2 (5^2 - 4,045^2)}{2} \right] = 643,908 \text{ дБ.}$$

Теперь вычислим нижнюю границу Q-функции:

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/643,908) - 10}{6,431} = -5,922.$$

Этому значению в таблице соответствует величина, равная $1 - 0,161 \cdot 10^{-8}$, это значение приблизительно равно единице. Считая по формуле (5.2), получаем $p(C) \approx 1 \cdot 100 = 1$.

Получившееся значение явно больше $\frac{P_c}{P_{III}}(\rho_0)$, которое из задания равно 10. Отсюда следует, что данный тип антенны и выбранное значение кластера не подходит для указанного стандарта.

Теперь рассмотрим случай для направленной антенны, у которой угол диаграммы направленности $\varphi = 120^\circ$, $N_S = 3$, $M=2$ и $\beta_1 = (q+0,7)^{-4}$, $\beta_2 = q^{-4}$.

Выберем значение $C=4$.

$$q = \sqrt{3 \cdot 4} = 3,464.$$

Определим α_e^2

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(0,23^2 \cdot 5^2\right) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^2 \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^2 \beta_i\right)^2} \right\} = 17,682 \text{ дБ.}$$

Вычислив квадратный корень из получившегося значение получаем

$$\alpha_e = \sqrt{17,682} = 4,025 \text{ дБ.}$$

Отсюда следует:

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,025^2} = 6,533 \text{ дБ.}$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^2 \beta_i \right) \exp \left[\frac{0,23^2 (5^2 - 4,025^2)}{2} \right] = 0,012 \text{ дБ.}$$

Теперь вычислим нижнюю границу Q-функции:

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/0,012) - 10}{6,533} = 1,384.$$

Этому значению в таблице соответствует величина, равная 0,0838.

Считая по формуле (5.2), получаем

$$p(C) \approx 0,0838 \cdot 100 = 8,38.$$

Получившееся значение немного меньше $\frac{P_c}{P_{III}}(\rho_0)$, отсюда вытекает,

что данный тип антенны является наиболее оптимальным.

Расчет частотных каналов, которые используются для обслуживания абонентов БС в одном секторе, определяется по формуле:

$$n_S = \text{int} \left(N_k / C \cdot N_S \right) \quad (5.10)$$

$$n_S = \text{int} \left(\frac{128}{4 \cdot 3} \right) = 10.$$

где N_S - число секторов.

Расчет допустимой нагрузки БС в одном секторе произведем по соотношению:

$$A = n_0 \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(P_B \sqrt{\pi \cdot n_0 / 2} \right)^{\frac{1}{n_0}}} \right]. \quad (5.11)$$

при условии, что

$$P_B \leq \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot n_0}}, \quad (5.12)$$

где $n_0 = n_S \cdot n_a$;

n_a - число абонентов, которые могут одновременно использовать один частотный радиоканал. В данном случае величина $n_a = 1$, т.к. используется аналоговый стандарт.

$$\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot 10}} = 0,252.$$

Подкоренное выражение больше, чем величина P_B , т.к. $0,11 < 0,252$.

$$A = 10 \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(0,11 \cdot \sqrt{\pi \cdot 10 / 2} \right)^{\frac{1}{10}}} \right] = 7,117 \text{ Эпл.}$$

При заданной активности одного абонента в час наибольшей нагрузки можно рассчитать число абонентов, которые обслуживаются одной БС по формуле

$$N_{aBTS} = \text{int}(A/\beta) \cdot N_S, \quad (5.13)$$

$$N_{aBTS} = \text{int}(7,17/0,026) \cdot 3 = 828.$$

Необходимое число базовых станций на заданной территории обслуживания определяется соотношением:

$$N_{BTS} = \text{int}(N_a / N_{aBTS}), \quad (5.14)$$

$$N_{BTS} = \text{int}(3600/828) = 13.$$

где N_a - заданное число абонентов, которых обслуживает сотовая сеть связи.

Величину радиуса соты определим используя выражение

$$R = \sqrt{1,21 \frac{S_0}{N_{BTS} \cdot \pi}}, \quad (5.15)$$

$$R = \sqrt{1,21 \frac{280}{43 \cdot \pi}} = 1,584 \text{ км}$$

5.2 Расчет требуемой помехоустойчивости сети и эффективности использования спектра

Величина защитного расстояния между BTS с одинаковыми частотными каналами определяется соотношением.

$$D = R\sqrt{3 \cdot C}, \quad (5.16)$$

$$D = 1,584\sqrt{3 \cdot 4} = 5,486 \text{ км.}$$

Необходимую мощность на входе приемника P_{npMS} при $h_{BST} = const$ и $P_{n\partial BTS} = const$ определяют, пользуясь так называемым первым уравнением передачи.

$$P_{npMS} = P_{n\partial BTS} + G_{BTS} - 70 - 26,16 \lg(f, \text{ МГц}) + 13,82 \lg(h_{BTS}, \text{ м}) - [45 - 6,55 \lg(h_{BTS}, \text{ м})] \cdot \lg(R, \text{ км}) - \alpha_{\phi BTS}, \text{ дБ}, \quad (5.17)$$

$$P_{npMS} = -110 + 11 - 70 - 26,16 \lg(950) + 13,82 \lg(30) - [45 - 6,55 \lg(30)] \cdot \lg(1,584) - 2 = 15,536 \text{ дБВт.}$$

где G_{BTS} - коэффициент усиления антенны базовой станции, дБ;

f - средняя частота выделенного диапазона частот;

$P_{n\partial BTS}$ - мощность передатчика BTS, дБВт;

$\alpha_{\phi BTS} = l_{\phi} \cdot \alpha_0$ - потери в фидере BTS, дБ;

l_{ϕ} - длина фидера, которая может быть равной или больше высоты

подвеса антенны BTS;

α_0 - погонное ослабление фидера, дБ/м.

Для определения вероятности ошибки, когда MS находится на границе зоны обслуживания BTS, необходимо использовать соотношение

$$P_{ош} \approx \frac{1}{(\sqrt{3} \cdot C - 1)^{2 \cdot k}}, \quad (5.18)$$

$$P_{ош} \approx \frac{1}{(\sqrt{3} \cdot 4 - 1)^{2 \cdot 3}} = 2,304 \cdot 10^{-5}$$

Важным параметром сотовой сети связи является эффективность использования радиоспектра γ , обусловленная числом активных абонентов на 1 МГц полосы частот на передачу (или прием) BTS, то есть

$$\gamma = \frac{N_a}{\Delta F}, \quad (5.19)$$

где полоса частот на передачу (или прием) $\Delta F = F_k \cdot N_{KBTS} \cdot C$, число

активных абонентов $N_a = N_{KBTS} \cdot N_{BTS} = N_{KBTS} \cdot 1,21 \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^2$.

$$\gamma = 1,21 \cdot \frac{R_0^2}{R^2 \cdot F_K \cdot C}, \quad (5.20)$$

где R_0 - радиус территории, которая обслуживается, $(S_0 = \pi \cdot R_0^2)$.

Отсюда

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0/\pi}{R^2 \cdot F_K \cdot C} = 1,21 \frac{S_0}{\pi \cdot R^2 \cdot F_K \cdot C}, \quad (5.21)$$

$$\gamma = 1,21 \frac{280}{\pi \cdot 1,584^2 \cdot 2,5 \cdot 10^4 \cdot 4} = 4,3 \cdot 10^{-4}.$$

5.3 Выбор оборудования базовых и мобильных станций

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.

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. 5.1 представлены основные параметры решений для разработки абонентского оборудования WiMAX.

Табл.5.1 Основные параметры решений для разработки абонентского оборудования WiMAX

Параметр	Fujitsu MB87	Intel PRO/Wireless 5116	Sequans SQN1010	Wavesat DM256/MC336
Функции	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC
Максимальная ширина канала	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Режим дуплекса	H-FDD, TDD, FDD (2 чипа)	H-FDD, TDD	H-FDD, TDD, FDD	H-FDD, TDD, FDD
Системный интерфейс	Mill, 32-bit generic	Mill	RMLL, PCI	PCI

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 предоставляет 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 решение PC102/PC8520 не заложены функции шифрования-дешифрования, для их выполнения должен быть использован внешний процессор.

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 и для разработки базовых станций. Это решение поддерживает полнодуплексный режим работы, но для реализации функций шифрования-дешифрования оно требует подключения внешнего процессора. Так же 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. 5.2.

Табл.5.2 Основные параметры рассмотренных решений для разработки базовых станций WiMAX

Параметр	Fujitsu MB87	PicoChip PC102/PC8520	Sequans SQN2010	Wavesat DM256/MC336
Функции	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC	PHY/MAC
Максимальная ширина канала	20 МГц	10 МГц	28 МГц	10 МГц
Количество чипов				
TDD				
FDD	1 чип	2 чипа	1 чип	1 чип
	1 чип	2 чипа	1 чип	1 чип
Системный интерфейс	Mill, 32-bit generic	Mill	RMLL, PCI	PCI
Радиointерфейс	Аналоговый и цифровой	цифровой	Аналоговый и цифровой	Аналоговый и цифровой

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.

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.

Для того чтобы два и более радиосигнала не мешали работе друг друга, необходимо, чтобы они не совпадали (пересекались) по частоте (частотному спектру), времени и в пространстве. Тем самым, каждая система для своего нормального функционирования должна иметь частотно-территориальный разнос (ЧТР) с мешающим сигналом (интерференцией). Кроме того,

поскольку имеем дело с цифровыми системами, радиосигналы в которых имеют форму импульса, то условие совпадения по времени означает совпадение или наложение по времени импульсов сигналов, приходящих в систему. Тем самым, временной разнос импульсов радиосигналов может быть обеспечен временной синхронизацией работы системы с источниками интерференции.

Сети стандарта IEEE 802.16 WiMAX являются на сегодняшний день наиболее высокотехнологичной системой BWA в области беспроводных телекоммуникаций и предъявляют повышенные требования к параметрам и качеству своего антенно-фидерного тракта. Антенны и СВЧ тракт в целом является самой капризной частью любой системы беспроводного доступа, в случае же сетей WiMAX, неправильная интеграция активного оборудования и СВЧ может свести к нулю все преимущества данной технологии. В базовых станциях сетей WiMAX могут использоваться всенаправленные и секторные антенны с углом сектора на 60, 90 и 120 градусов.

При установке базовых станций используется существующая инфраструктура (рис5.1).

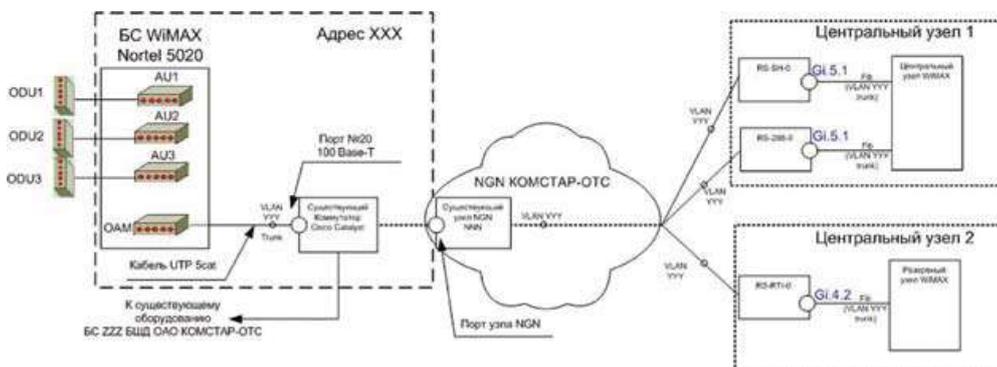


Рис.5.1 Типовая схема включения БС WiMAX, размещенных на существующих площадках БЩД с использованием транспортных каналов NGN

Местоположение WiMAX-площадок должно выбираться таким образом, чтобы обеспечить максимальную производительность. С точки зрения операционной эффективности особое внимание необходимо обращать

на операционную поддержку процесса развертывания площадок, а также на их стандартизацию. Это позволяет экономить время и деньги, затрачиваемые на проектирование каждой индивидуальной площадки. Стандартизация подразумевает создание небольшого набора конфигураций, которые берутся как готовые проекты и подгоняются с минимальными изменениями под специфику конкретной площадки. На рынке существуют инвентарные решения, поддерживающие автоматизацию такого процесса. Особое внимание в таких решениях следует уделять поддержке актуальности инвентарных данных, так как в дальнейшем они будут необходимы для расширения WiMAX-площадок по мере роста спроса и для гарантирования высокого уровня услуг.

Выводы по главе 5

1. 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.

2. Оборудование Mobile WiMAX обеспечивает большую скорость передачи данных, по сравнению с сотовыми сетями, и сравнима со скоростью доступа в проводных сетях.

3. Функционально оборудование WiMAX разделяется на базовое и абонентское. Для реализации MAC-протокола базовой станции требуется увеличение производительности этих решений. Для этого используются внешние процессоры, служащие для выполнения верхнего уровня MAC-протокола, т.е. чипсеты WiMAX реализуют функции физического уровня и функции нижнего уровня MAC-протокола.

Заключение

Использование информационных технологии Mobile WiMAX позволяют предоставить относительно дешевое покрытие беспроводным широкополосным доступом в Интернет. Как показывают расчеты, использование данной технологии эффективно при покрытии больших территорий.

Приведен и обоснован метод внедрения WiMAX с усовершенствованными функциями и рабочими характеристиками.

Прибыльная бизнес-модель WiMAX с более высоким покрытием и улучшающая энергетические потенциалы линий связи (link budget) WiMAX может быть достигнута при использовании передовых антенных технологий (MIMO и AAS): MIMO A/B & STC:.

Представленная сетевая архитектура SI3000 Light ASN, основанная на простой иерархии со сконфигурированными однородными (commodity) сетевыми элементами, обеспечивает структуру связи между базовой сетью CSN и радиосетью WiMAX.

Произведена разработка сети WiMAX для широкополосного доступа в интернет, а именно выбраны и рассчитаны основные характеристики радиоинтерфейса, произведен расчет требуемой помехоустойчивости сети и произведен выбор оборудования базовых и мобильных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I.Законы Республики Узбекистан

1.Закон Республики Узбекистан «О связи». Ведомости Верховного Совета Республики Узбекистан, 1992 г., №3, ст.159; Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1998 г., №3,ст.38; 2000 г., № 5 – 6, ст.153; 2003 г., №5, ст.67.

2.Закон Республики Узбекистан «О телекоммуникациях». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999 г., №9, ст.219; Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2004 г., №37, ст.408; 2005 г., №37-38, ст.279; 2006 г., №14, ст.113; 2007 г., №35-36, ст.353; 2011 г., №52, ст.557.

3.Закон Республики Узбекистан «О радиочастотном спектре». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 1999 г., №1, ст.16; 2003 г., №5, ст.67.

4.Закон Республики Узбекистан «Об информатизации». Ведомости Олий Мажлиса Республики Узбекистан, 2004 г., №1-2, ст.10.

II.Указы и постановления Президента Республики Узбекистан,

Постановления Кабинета Министров

5.Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий», 21 марта 2012 г., №ПП-1730. Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2012 г., №13. Ст.139.

6.Программа дальнейшего внедрения и развития информационно-коммуникационных технологий в Республике Узбекистан на 2012-2014 годы. Постановление Президента от 21.03.2012 г., №ПП-1730.

III.Произведения Президента Республики Узбекистан И.А.Каримова

7.Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана / И.А.Каримов. – Т.: Узбекистан, 2009, - 48 с.

8.Каримов И.А. Обеспечить поступательное и устойчивое развитие страны – важнейшая наша задача. – Т.17.-Т. «Узбекистан» - 2009, - 184 с.

IV.Основная литература

9.В.И. Носов Сети радиодоступа. Часть 1.: Учебное пособие. УМО по специальности связь/ СибГУТИ. – Новосибирск, 2006 г. – 256 стр.

10.В.И. Носов Сети радиодоступа. Часть 2.: Учебное пособие. УМО по направлению «Телекоммуникации»/ СибГУТИ. – Новосибирск, 2007 г.

11.В. Вишнеvский, С. Портной, И. Шахнович. Энциклопедия WiMAX путь к 4G: Учебное пособие. Техносфера, Москва, 2009;

12.Шахнович И. Архитектура сети WiMAX: основные элементы и принципы. – Первая миля, 2009, №1, с.6–15.

13.А.Иванов, С.Портной Оборудование WiMAX – решение компании Alvarion – Первая миля, 2009, №2, с. 32-39.

V.Дополнительная литература

14. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. М.: Эко-Трендз, 2007.

15. В. Вишнеvский, С. Портной, И. Шахнович. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. Техносфера, 2009.

16. Весоловский Кшиштоф. Системы подвижной радиосвязи. Горячая линия – Телеком, 2006.

17. Григорьев В.А., О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. Сети и системы радиодоступа. Эко-Трендз, 2005.

18. Н.Н. Карабутов Информационные технологии в экономике. Издательство: Экономика; 208 стр., 2003 г.

19. И.И. Родионов, и др. Рынок информационных услуг и продуктов. Издательство: МК-Периодика 552 стр., 2002 г.

20. А.В. Волокитин, и др. Средства информатизации государственных организаций и коммерческих фирм. Справочное пособие. Издательство: ФИОРД-ИНФО 272 стр., 2002 г.

21. Ю. Шафрин. Информационные технологии. Часть 2. Издательство: Бинوم. Лаборатория знаний; 320 стр., 2002 г.
22. М.Р. Когаловский. Перспективные технологии информационных систем. Издательства: ДМК Пресс, Компания АйТи; 288 стр., 2003 г.
23. И.А. Стрелец. Новая экономика и информационные технологии. Издательство: Экзамен, 256 стр., 2003 г.
24. Томас Хюлланд Эриксен. Тирания момента. Время в эпоху информации. Издательство: Весь Мир, 208 стр., 2003 г.
25. В.В. Липаев. Системное проектирование сложных программных средств для информационных систем. Издательство: Синтег; 268 стр., 2002 г.

VI. Периодические издания, статистические сборники и отчеты

26. Сергей Пахомов . Широкополосный беспроводной доступ
Компьютер Пресс 5'2004.
27. Константинов Е. Реалии широкополосного доступа, или о том, чем Россия пока не избалована//Вестник связи, 2004, № 6.
28. Yankee Group о мировом рынке широкополосного доступа.
Телекомфорум. Вести, 2004, июль.

VII. Интернет сайты

29. Shurchkov I. Towards a Knowledge-Based Economy. Russian Federation. Country Assessment Report. UNECE Materials, www.unece.org.
30. <http://www.3dnews.ru/communication/wimax/>.
31. http://www.telecomforum.ru/vesti/2004/07/14_03.htm.
32. <http://www.intuit>.
33. http://www.geysertelecom.ru/rus/products/full/alvarion_breezemax/breezemax/