

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**


Кафедра «Телекоммуникационные системы»  
Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
к.т.н., профессор Байкенов А.С.  
(ученая степень, звание, ФИО)

\_\_\_\_\_  
(подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ  
пояснительная записка**

на тему: «Исследование влияния параметров радиосигнала на качество  
передачи в мультисервисной сети WIMAX»

Магистрант: Изенбаев К.Н.  группа МТСП-14-1  
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель: к.х.н., ст. преподаватель  Кудинова В.С.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент: к.т.н., доцент каф.РГ  Липская М.А.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ: ст. преподаватель  Демидова Г.Д.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтроль: ст. преподаватель  Кондратович А.П.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы 2016



Рисунок 3.2 – Зависимость между C/I и требуемой мощностью сигнала C;

Рекомендуемая основная литература:

1. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.:Эко-Трендз, 2008. – 384 с.
2. Fantacci, R., Marabissi, D., Tarchi, D., Habib, I., Dept. of Electron. & Telecommun., Univ. of Florence, Firenze, Italy «Adaptive modulation and coding techniques for OFDMA systems»; IEEE Transactions on Wireless Communications, September 2009, vol. 8, iss. 9, pp. 4876 – 4883.

**Г Р А Ф И К**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Обзор технологии WiMax	05.09.2014- 29.09.2014	
2. Изучение оборудования. Беспроводные точки доступа. Технические характеристики оборудования Iskratel SI3000	02.10.2014- 06.11.2014	
3. Экспериментальное исследование статистического характера адаптивной модуляции WiMAX	05.10.2015- 10.11.2015	
4. Анализ качества предоставления услуги triple play в сети WiMAX	02.11.2015- 31.11.2015	
5. Общий анализ теоретических расчетов и экспериментальных данных	05.12.2015- 28.12.2015	

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (подпись) (Байкенов А.С.)  
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ (подпись) (Кудинова В.С.)  
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант \_\_\_\_\_ (подпись) (Изенбаев К.Н.)  
(Ф.И.О.)

## **Аннотация**

Темой диссертационной работы является: "Исследование влияния параметров радиосигнала на качество передачи в мультисервисной сети WiMAX".

Диссертация посвящена определению статистического характера используемых видов модуляций, способных поддержать заданную скорость без ухудшения качественных показателей канала при передаче услуги tripleplay.

Были проведены экспериментальные исследования на оборудовании IskratelSI3000. Были рассчитаны энергетические параметры радиоканала WiMAX.

Проведены исследования о влиянии интерференции на канал связи OFDM. Представлены технические рекомендации для улучшения качества передачи услуги tripleplay по сети WiMAX.

## **Abstract**

The subject of dissertation work is: "Research of radio signal parameters' influence on quality of transfer in the multiservice WiMAX network".

The thesis is devoted to definition of a statistical property of the used types of the modulations, capable to take the set speed without deterioration of channel's quality indicators at triple play's service transfer.

Experimental researches on the equipment Iskratel SI3000 were conducted. Power parameters of a WiMAX radio channel were calculated.

Researches of interference influence on OFDM communication channel are conducted. Technical recommendations for improvement of service triple play transfer quality in the WiMAX network are submitted.

## **Аңдатпа**

Магистірлік диссертацияның тақырыбы: «Радиосигналдың параметрлерінің мультисервистік WiMAX желінің өткізетін сапасына әсерін зерттеу».

Магистірлік диссертация triple play қызметін көрсету кезінде модуляция түрлерінің статистикалық сипаттамасының қабілетті қолдау көрсету және арнаны өткізу кезінде белгіленген жылдамдығын төмендетпей сапалық көрсеткіштерін анықтауына арналған.

Iskratel SI3000 жабдықта эксперименттік зерттеулер жүргізілген. WiMAX радиоарнаның энергетикалық параметрлері есептелген.

OFDM арнаның желіне интерференцияның әсері туралы зерттеулер жүргізілді. WiMAX желісі бойынша triple play қызметтерінің өткізетін сапасын жақсарту үшін техникалық нұсқаулықтар ұсынылған.

## Содержание

Введение	6
1 Состояние проблемы, цели и задачи исследования	7
1.1 Цели и задачи беспроводной технологии WiMAX	7
1.2 Актуальность проектирования сетей WiMAX	8
1.3 Технические возможности стандарта WiMAX для предоставления услуги tripleplay	12
1.4 Оценка параметров качества услуг в сетях WiMAX	18
1.5 Возможность передачи интерактивного телевидения в сети WiMAX	22
2 Исследование возможности построения сети WiMAX для предоставления мультимедийных услуг	27
2.1 Экспериментальное исследование статистического характера адаптивной модуляции	27
2.2 Анализ качества предоставления услуги tripleplay в сети WiMAX	37
2.3 Определение максимальной пропускной способности используемых видов модуляции	40
3 Исследование характеристик радиоканала WiMAX	43
3.1 Исследование энергетических параметров канала WiMAX	43
3.2 Исследование влияния интерференции на OFDM канал связи WiMAX	48
3.3 Определение скорости передачи данных на сектор	56
4 Разработка рекомендаций для улучшения качества передачи услуги tripleplay по сети WiMAX	58
Заключение	61
Перечень сокращений	64
Список литературы	66
Приложение А Окно расчетов, выполненных с помощью программы MathCAD	69

## Введение

Интенсивное развитие сетевых технологий в последние годы характеризуется существенным повышением уровня требований, предъявляемых к разработке новых, более эффективных способов передачи и приема информации. В настоящее время значительно расширился круг задач, решаемых техническими ресурсами сетей по обеспечению максимальной пропускной способности с гарантированным качеством. В первую очередь это обусловлено активным развитием сетевых технологий с интеграцией услуг, требующих от каналов связи оптимальной производительности.

Поэтому появление технологии WiMAX было вызвано естественным развитием потребностей в услугах широкополосного доступа к сетям передачи данных. WiMAX – это новое поколение технологии беспроводной связи, разработанное для обеспечения повсеместного высокоскоростного мобильного доступа в интернет с самых разнообразных устройств, в том числе с ноутбуков, телефонов, смартфонов и разнообразных устройств бытовой электроники, в том числе с игровых консолей, фотоаппаратов, видеокамер, музыкальных проигрывателей. Технология позволяет создавать недорогие открытые сети и становится первым мобильным интернет-решением на базе IP-протокола, позволяющим создавать эффективные и масштабируемые сети для передачи данных, видео и телефонии.

Цель технологии заключается в том, чтобы предоставить универсальный беспроводный доступ для широкого спектра устройств: рабочих станций, бытовой техники "умного дома", портативных устройств и мобильных телефонов и их логического объединения - локальных сетей.

Из 6 миллиардов сегодняшних жителей земного шара две трети остаются отрезанными от фиксированных и мобильных коммуникаций. Именно для этой части населения BWA является эффективным и экономичным способом организации базового сервиса телекоммуникаций. Технология WiMAX – позволяет предоставлять широкополосные услуги tripleplay для абонентов, чьи дома или офисы расположены в районах города, где нет свободных линий связи, а стоимость прокладки новых слишком высока. Поэтому развитие сетей WiMAX в мегаполисах является актуальной альтернативой существующим широкополосным технологиям, таким как xDSL, Wi-Fi и xG. В данной работе будут рассмотрены вопросы, связанные с построением мультисервисной сети на базе стандарта IEEE 802.16, и проведены исследования для повышения качества передаваемых услуг.

## **1 Состояние проблемы, цели и задачи исследования**

### **1.1 Цели и задачи беспроводной технологии WiMAX**

При переходе к созданию систем широкополосного радиодоступа с интеграцией услуг стало понятно, что основные принципы, заложенные в беспроводные системы на предыдущих этапах, нуждаются в значительной коррекции. На сигнальном уровне первоочередное значение достало оптимальное использование спектрального ресурса радиоканала при любых соотношениях "скорость - помехозащищенность". На уровне протоколов стало необходимым обеспечивать заданный уровень качества обслуживания (QoS) любому абоненту сети.

С этой целью в 2004 году был разработан стандарт IEEE 802.16-2004, что представляет собой рассчитанную на введение в городских беспроводных сетях технологию без ведущего широкополосного доступа операторского класса. Используется коммерческое название стандарта WiMAX. Для прогресса и развития технологии WiMAX был создан WiMAX-форум: на основе рабочей группы IEEE 802.16, созданной в 1999. Форум включал такие фирмы как Nokia, Harris Corporation, Ансамбль, Crosspan и Aperto. К маю 2005 форум уже объединил больше чем 230 участников. Тот же самый год Мировой конгресс относительно информационного сообщества сформулировал следующие задачи, которые были назначены на технологию WiMAX [1]:

а) чтобы обеспечить доступ к услугам информационно-коммуникационных технологий для небольших поселений, отдаленных областей, изолированных объектов посредством WiMAX;

б), Чтобы предоставить посредством доступа WiMAX к услугам информационно-коммуникационных технологий больше чем половине из населения планеты в пределах досягаемости. Цель технологии WiMAX состоит в обеспечении универсального беспроводного доступа для широкого диапазона устройств и их логической ассоциации – местные сети. Нужно отметить, что у технологии есть много преимуществ:

а) по сравнению с проводом радио или спутниковые системы сети WiMAX должны позволить операторам и экономно эффективно захватить поставщиков услуг не только новые потенциальные пользователи, но также и расширить диапазон информационно-коммуникационных технологий для пользователей, у которых уже есть фиксированный доступ;

б) стандарт объединяет сам по себе технологии уровня телекоммуникационного оператора, и также технологию "последней мили", которая создает универсальность и, в результате увеличивает надежность системы; Беспроводные технологии

в) более гибки и, в результате более просты в расширении, поскольку как требуется может быть измерен;

д) простота установки как фактор сокращения затрат на расширение сетей в развивающихся странах, малонаселенных или отдаленных районах;

- е) диапазон освещения - существенный индикатор системы радиосвязи;
- ж) технология WiMAX первоначально включает IP протокол, который позволяет легко и прозрачен, чтобы объединить ее в местные сети;
- з) технология WiMAX подходит для фиксированных, перемещенных и мобильных объектов сетей на однородной инфраструктуре.

На структуре сети IEEE 802.16 стандарт очень подобны традиционным сетям мобильной связи: здесь есть базовые станции, которые работают в радиусе до 50 км, таким образом также не обязательно установить их на башнях. Крыши зданий вполне подходят для них, только соблюдение условия прямой видимости между станциями требуется.

Связь базовой станции с пользователем требует существования оборудования подписчика. Далее сигнал может прибыть в стандартный кабель Ethernet, как непосредственно на конкретном компьютере, и на пункте доступа стандарта 802.11 Wi-Fi или к местной проводной сети стандарта Ethernet [2].

Это позволяет сохранять существующую инфраструктуру региональных или офиса местными сетями после перехода от кабельного доступа до WiMAX. Это позволяет упрощать также как можно больше расширение сетей, позволяя использовать знакомые технологии для связи компьютеров.

## **1.2 Актуальность проектирования сетей WiMAX**

Международный опыт показывает, что высокие технологии, в том числе информационные и телекоммуникационные, являются локомотивом социально-экономического развития многих стран мира, а обеспечение гарантированного свободного доступа граждан к информации – это одна из важнейших задач государств.

В общем все возможные варианты использования технологии WiMAX принадлежат одному из четырех классов. Первый класс - радио "последняя миля" для крутых рынков – услуги по голосовой передаче и широкополосному доступу к данным для людей и корпоративных клиентов в городах и пригороде, и также для людей в областях с низкой плотностью населения. Второе радио класса "последняя миля" для новых и развивающихся рынков – главным образом, голосовые услуги и, возможно, передача данных для тех областей, в которых нет никакой проводной коммуникации. От 6,5 миллиардов сегодняшних жителей земного шара две трети остаются отключенными от фиксированной и мобильной связи. Поскольку эта часть населения BWA - эффективный и экономический способ организации основной услуги телекоммуникаций с помощью технологии VoIP, и также для обеспечения высокоскоростного доступа в Интернет как направление будущего развития услуг. Производители оборудования домашнего компьютера управляются этой категорией пользователей, планируя выпуск недорогих устройств. Рост аудитории потребителей такого оборудования дома будет стимулировать рост потребностей в расширении полосы пропускания каналов связи, и BWA кажется технологией, способной,



чтобы ответить этим растущим требованиям. Третий класс - мобильный Интернет для развитых и развивающихся рынков (зона хот) – для пользователей, перемещающих город, кто использует обычные услуги передачи данных на открытом воздухе и офиса. С точки зрения технологий это - последний шаг на пути к реальной сходимости в клеточных сетях IP, обеспечивающих полную подвижность после перехода между сетями на основе различных технологий. И последний класс - сходящиеся IP услуги в сотовых сетях – поддержка мобильных приложений широкополосной сети, например, видео, для добавления услуг 3G сетей в целях улучшения возможностей полосы пропускания на способе развития к услугам Тройного уровня Игры. Фактически все три, которые рассматривают выше сегмента, представляют компоненты, формирующие путь к сходящимся IP услугам в сотовых сетях, понимающих принцип лучшей связи всегда и везде [3].

Сети WiMAX фиксированного доступа предназначены для обслуживания:

- индивидуальных стационарных пользователей;
- корпоративных пользователей ЛВС;
- коллективных пользователей домашней ЛВС;
- абонентов B2B, например Wi-Fi сетей доступа.

Базовые станции фиксированного WiMAX обычно имеют невысокую выходную мощность 18-24 дБм и предназначены для обслуживания в радиусе до 50 км в условиях LOS и до 5 км nearLOS десятков корпоративных и сотен стационарных домашних абонентов, оснащенных абонентскими устройствами с внешними антеннами с высоким усилением.

Корпоративные абоненты фиксированного WiMAX обычно предъявляют высокие требования к скорости передачи данных 1-6 Мбит/с, к качеству канала связи и характеризуются значительным потреблением трафика.

Основными потребителями услуг сетей WiMAX фиксированного доступа являются стационарные пользователи корпоративных локальных сетей, стационарные коллективные пользователи домашних ЛВС, B2B абоненты, а также стационарные индивидуальные пользователи.

В этих сегментах рынка сети WiMAX фиксированного доступа конкурируют с проводными сетями: оптические, кабельные, медные телефонные и DSL сети и сети широкополосного беспроводного доступа Fixed BWA предыдущих поколений типа RadioEthernet, Wi-Fi MAN, preWiMAX.

Сети фиксированного WiMAX не конкурируют с сетями Wi-Fi, предназначенными для построения внутриофисных локальных беспроводных WLAN сетей.

Сегмент рынка индивидуальных пользователей общий как для фиксированного, так для мобильного WiMAX. При этом, если абонентами мобильного WiMAX могут являться индивидуальные домашние пользователи в центральных районах города, находящиеся на небольших дальностях в условиях NLOS от базовой станции, то абонентами фиксированного WiMAX

могут являться индивидуальные домашние пользователи на окраине города и в пригороде, находящиеся в условиях прямой или оптической видимости на больших дальностях от базовой станции.

В данном сегменте рынка сети фиксированного WiMAX в основном конкурируют с сетями DSL. При этом сети фиксированного WiMAX имеют конкурентные преимущества по обеспечиваемой скорости передачи данных по сравнению с сетями DSL при обслуживании индивидуальных абонентов, расположенных на больших дальностях от операторского оборудования доступа.

Сети беспроводного широкополосного доступа BWA типа RadioEthernet, Wi-Fi MAN, preWiMAX не имеют возможности эффективного предоставления услуги беспроводного доступа индивидуальным абонентам вследствие технологических ограничений на максимальное количество одновременно обслуживаемых базовой станцией абонентов. Это не позволяет таким сетям конкурировать с сетями WiMAX фиксированного доступа в данном сегменте рынка[4].

В сегменте рынка корпоративных абонентов и домашних ЛВС сети WiMAX фиксированного доступа конкурируют с проводными операторами и операторами широкополосного беспроводного доступа BWA типа RadioEthernet, Wi-Fi MAN, preWiMAX.

Основным конкурентными преимуществами сетей WiMAX фиксированного доступа по сравнению с беспроводными сетями BWA предыдущего поколения в данном сегменте рынка являются:

- высокая пропускная способность, благодаря высокой спектральной эффективности оборудования WiMAX, что в два и более раз выше по сравнению с сетями Wi-Fi MAN, RadioEthernet и preWiMAX;

- высокая дальность связи за счет высоких энергетических параметров канала связи. Это обеспечивает высокую скорость передачи данных на большей дальности и наоборот, на заданной дальности сеть WiMAX поддерживает самую высокую скорость передачи данных по сравнению с другими системами BWA;

- возможность стабильной работы в условиях отсутствия прямой видимости NLOS, обусловленной устойчивостью OFDM сигнала к переотражениям радиосигнала при работе в условиях городской застройки;

- большое количество одновременно обслуживаемых одной базовой станцией беспроводных абонентов с обеспечением высоких параметров качества абонентских каналов связи за счет применения протокола множественного доступа TDMA;

- возможность предоставления качества обслуживания QoS;

- эффективное использование частотного спектра за счет высокой помехоустойчивости и высоких параметров ЭМС.

В целом сети WiMAX фиксированного доступа имеют очевидные технологические преимущества по сравнению с фиксированными беспроводными сетями предыдущих поколений. Сети WiMAX

фиксированного доступа имеют также преимущества по стоимости абонентских устройств, по показателю производительность /стоимость оборудования базовых станций, а также по стоимости управления и обслуживания сети.

Сети фиксированного WiMAX имеют конкурентные преимущества по обеспечиваемой скорости передачи данных по сравнению проводными сетями, использующими медные телефонные кабели, включая сети DSL при обслуживании корпоративных абонентов, расположенных на средних и больших дальностях свыше 5-7 км от операторского оборудования доступа. При наличии возможности доступного по цене проводного подключения корпоративной ЛВС к оборудованию оператора связи по медному кабелю с характеристиками, необходимыми для поддержки требуемой пропускной способности, сети фиксированного WiMAX в корпоративном сегменте рынка не имеют конкурентных преимуществ, кроме высокой оперативности подключения с проводными каналами связи.

Во многих случаях высокоскоростное подключение корпоративных абонентов по медному или оптическому кабелю затруднено или невыгодно по техническим или организационным причинам. Прокладка, например, оптического или другого кабеля по кабельным колодцам или столбам в городе может быть ограничена регуляторными или другими компетентными органами и конкурирующими организациями. Также прокладка, например, оптического кабеля к каждому зданию в городе или тем более в пригороде или районом центре может быть экономически нецелесообразным.

В большинстве случаев применение сетей WiMAX фиксированного доступа позволяет обеспечить для корпоративных абонентов, находящихся на окраинах города или в пригороде, а также в центральных районах городов, не охваченных услугой DSL доступа, большую скорость передачи данных на больших дальностях по сравнению с проводными каналами связи. Как правило, сети фиксированного WiMAX имеют преимущества по стоимости подключения в случае необходимости прокладки оптического кабеля на большие расстояния.

В целом применение сетей фиксированного доступа WiMAX в сегменте рынка широкополосного доступа корпоративных абонентов является эффективным решением, и имеет конкурентные преимущества в районах с недостаточно развитой проводной сетевой инфраструктурой[5].

### **1.3 Технические возможности стандарта WiMAX для предоставления услуги tripleplay**

Структура символа OFDM состоит из трех типов поднесущих, как показано на рисунке 2.3:

- Данные поднесущие для передачи данных;
- Пилот поднесущих для оценки и синхронизации целей;
- Нулевых поднесущих для передачи не, используется для защитных полос и носителей постоянного тока на рисунке 1.1.

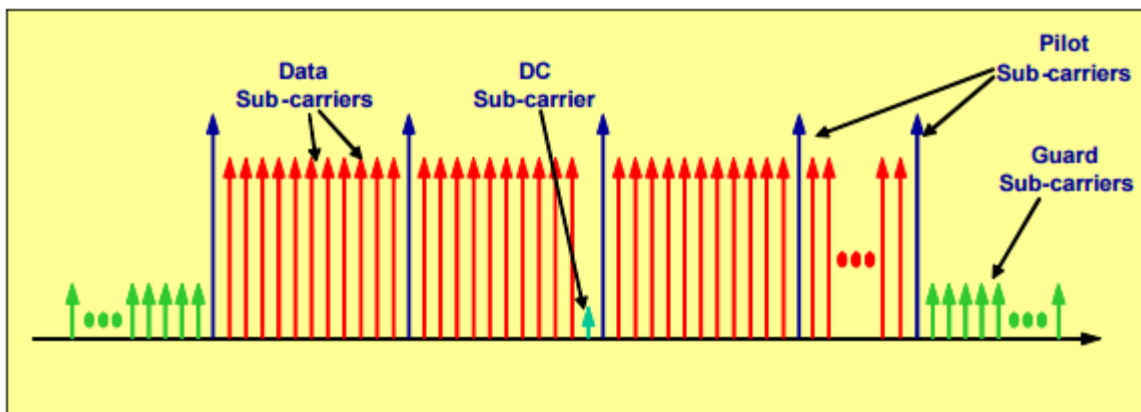


Рисунок 1.1 - OFDM поднесущей Структура

Активные (данные и пилотные) поднесущих сгруппированы в подмножества поднесущих, называемых подканалами.

WiMAX OFDM PHY [3] поддерживает суб-формирование каналов в обоих ДЛ и УЛ. Минимальная частота-время ресурс югу от канализацией один слот, который равна 48 тонов данных (поднесущих).

Есть два типа поднесущей перестановок для суб-канализацией: разные и смежные. Разнообразие перестановок привлекает поднесущие псевдослучайным с образованием суб-канал. Это обеспечивает частотное разнесение и усреднение помех между сотами. разнообразие перестановки включают DL FUSC (Полностью используемой поднесущей), DL (частично PUSC Б поднесущей) и UL PUSC и дополнительные опции перестановки. С DL PUSC, для каждой пары символов OFDM, доступные или используемые поднесущие сгруппированы в кластеры, содержащие 14 смежных поднесущих за период символа, с пилотом и данных выделение в каждом кластере в четных и нечетных символов, как показано на рисунке 1.2.

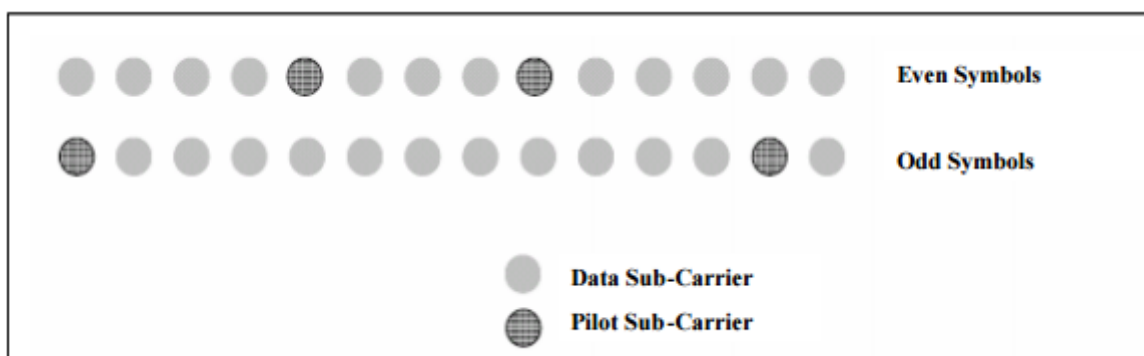


Рисунок 1.2 - Частота Различные югу-канальный

Повторное организации схема используется для формирования групп кластеров таким образом, чтобы каждая группа состоит из кластеров, которые распределены по всему пространству поднесущей. Подканала в группе содержит два (2) кластера и состоит из 48 вспомогательных несущих частот данных и восемь (8) контрольных поднесущих.

В информационных поднесущих в каждой группе далее переставляются, чтобы генерировать подканалы в группе. Таким образом, только пилот позиции в кластере приведены в Рисунок 5. Данные поднесущих в кластере распределены по нескольким подканалов. Аналогична структуре кластера для DL, структура плитки определяется для UL PUSC формат которого показан на рисунке 1.3

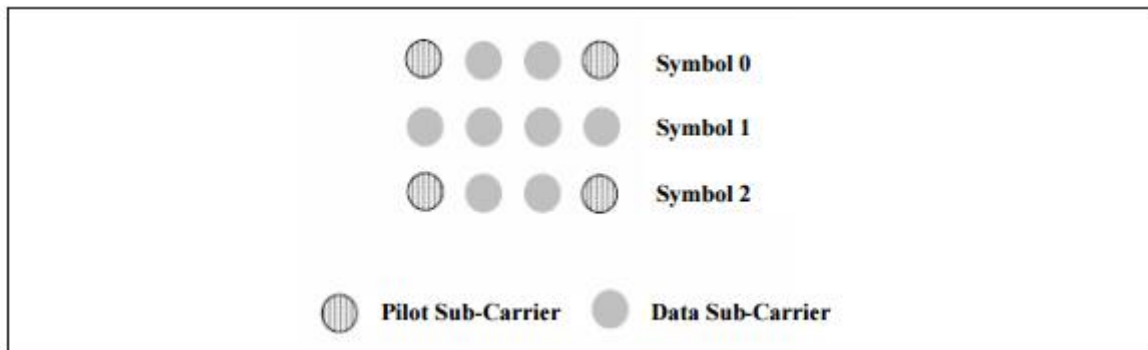


Рисунок 1.3 - Плитка Структура для UL PUSC

Обычно, многолучевое распространение приводит к резкому повышению шума на входе приемника и замираниям сигнала на произвольных частотах. Природа нескольких медленных субканалов OFDM позволяет избежать этого. В случае появления коллизий передача прекращается только по одному каналу из многих рисунок 1.4. Поэтому технология OFDM отлично подходит для сложной частотной обстановки мобильной связи.[7]

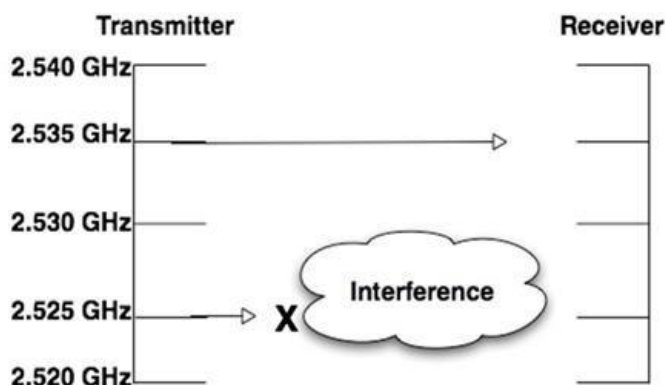


Рисунок 1.4 - OFDM предотвращают интерференцию при помощи множества поднесущих

Свободное пространство поднесущей разделена на плитки и шести (6) плитки, выбраны из поперек весь спектр посредством повторного организации схемы / перестановки, которые сгруппированы вместе, чтобы образуют щель. Слот состоит из 48 вспомогательных несущих частот данных и 24 поднесущих пилот-сигнала в 3 OFDM символы.

Смежные группы подстановок блок смежных поднесущих, чтобы сформировать подканал. Смежные перестановки включают DL AMC и UL

АМС, и имеют та же самая структура. Это закладка состоит из 9 последовательных поднесущих в символе, с 8 присвоен для данных и один назначен для пилота. Слот в АМС определен как совокупность бункеров тип  $(N \times M = 6)$ , где  $N$  есть число смежных контейнеров и  $M$  есть число смежные символы. Таким образом, разрешенные комбинации [(6 бункеров, 1 символ), (3, 2 бункеров символы), (2, 3 бункеров символы), (1, 6 бен символы)]. КУА перестановка позволяет многопользовательский разнообразие выбрав суб-канал с наилучшим АЧХ рисунок 1.5.

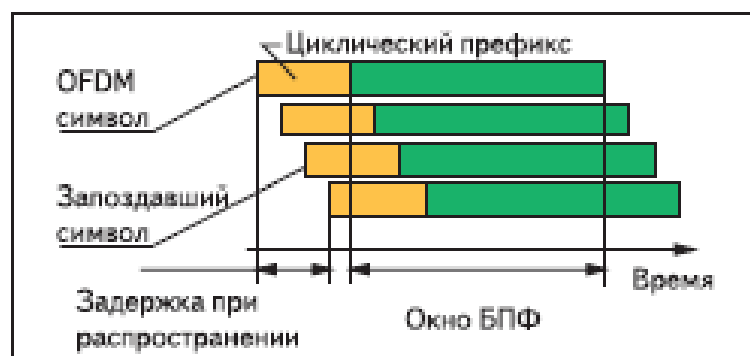


Рисунок 1.5 - Обработка OFDM-символа при многолучевом распространении

Стандарт 802.16e-2005 в режиме IEEE беспроводной MAN OFDMA основан на концепции масштабируемый OFDMA (S-OFDMA). S-OFDMA поддерживает широкий спектр полосы пропускания для гибко удовлетворить потребность в различных требований распределения спектра и модели использования.

Масштабируемость поддерживается при помощи регулировки размера FFT во время фиксации поднесущую разнос частот на 10,94 кГц. Поскольку ширина полосы поднесущей единицу ресурсов и длительность символа является фиксированной, влияние на более высокие уровни является минимальным, когда масштабировании пропускная способность. Параметры S-OFDMA перечислены в таблице 1. Система полосы для два из первоначальных плановых профилей разрабатывается WiMAX форум технической рабочая группа по версии-1 являются 5 и 10 MHz3 (выделено в таблице).

Стандарт 802.16e PHY [3] поддерживает TDD и полной полудуплексном режиме FDD; однако первый выпуск профилей сертификации Mobile WiMAX будет включать в себя только TDD. С текущие релизы, профили FDD будут рассмотрены WiMAX Forum в адрес конкретные рыночные возможности, где нормативные требования локального спектра либо запретить TDD или больше подходят для развертывания FDD. Чтобы противостоять вопросы помех, TDD требует общесистемного синхронизации; Тем не менее, TDD является предпочтительным двусторонней режим по следующим причинам:

- TDD позволяет регулировать соотношение нисходящей линии/восходящей линии связи, чтобы эффективно поддерживать асимметричная

нисходящей / восходящей линии связи, трафик, в то время как с FDD, нисходящей и восходящей линий всегда зафиксировали и в целом, равный DL и UL полосы пропускания.

- TDD обеспечивает канал взаимности для лучшей поддержки в адаптации линии, MIMO и другие замкнутым циклом передовые технологии. антенна

- В отличие от FDD, которая требует пару каналов, TDD требует только одного канала для нисходящего и восходящего каналов обеспечивает большую гибкость для адаптации к разнообразным глобальные распределения спектра.

- Приемопередатчик конструкций для реализации TDD являются менее сложными и, следовательно, менее дорогая[8].

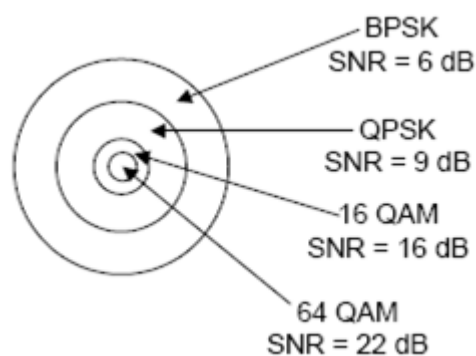


Рисунок 1.6 - Предпочтительный метод модуляции в зависимости от отношения сигнал/шум

Division Duplex (TDD) реализация. Каждый кадр делится на DL и UL подкадров, разделенных передача / прием и принимать / передавать Переходные пробелы (ТТГ и РТГ, соответственно), чтобы предотвращения столкновений передачи DL и UL. В кадре, в следующем управляющая информация используется для обеспечения оптимальной работы системы:

- Преамбула: Преамбула, используемый для синхронизации, первый символ OFDM, из Рамка.

- Рамка управления Заголовками (FCH): The FCH следующим преамбулу. Это обеспечивает Информация о конфигурации рамы, таких как длина сообщения MAP и схемы кодирования и используемые суб-каналов.

- DL-MAP и UL-MAP: DL-MAP и UL-MAP обеспечивают суб-канал распределение и другая информация управления для DL и UL подкадров соответственно.

- UL Ранжирование: UL-диапазоне подканал выделяется для мобильных станций (MS), чтобы выполнить с замкнутым циклом времени, частоты и регулировка мощности, а также пропускную способность Запросы.

- UL ОКП: Канал UL ОКП выделяется для MS информации государственного канала обратной связи.

- UL ACK: UL-ACK выделяется для MC обратной DL HARQ примите во внимание.

При использовании адаптивной модуляции совместно с функциями QoS и приоритезации трафика, имеется возможность устанавливать высокий приоритет важному трафику, передача которого тем самым будет осуществляться с максимальной надежностью при любых условиях; ухудшение условий будет сказываться только на низкоприоритетном трафике.

В стандарте IEEE 802.16-2004 технология множественного доступа с разделением по времени в соответствии с которым базовая станция распределяет на абонентские станции временных интервалов, что они могут передавать данные в определенной последовательности, но не случайным образом используется. Для реализации дуплексного режима обмена данными используются две технологии: дуплексный режим с разделением по времени из восходящих и нисходящих потоков и дуплексном режиме с разделением по частотам.

В соответствии со стандартом, для предотвращения несанкционированного доступа и защиты данных пользователя шифрования всего трафика, передаваемого по сети осуществляется. Базовая станция WiMAX представляет модульную конструкцию, в которой при необходимости можно установить несколько модулей с различными типами интерфейсов, но при этом административный программное обеспечение для управления сетью должен быть поддержан.

Это программное обеспечение обеспечивает централизованное управление всей сетью. Логическое дополнение в существующую сеть абонентских комплектов осуществляется также через этот административной функции. Абонентская станция представляет собой устройство, имеющее уникальный серийный номер, MAS-адрес, а также цифровую подпись X. 509, на основании которой имеется аутентификации АС на БС. Таким образом, в соответствии со стандартом, АС делает срок действия цифровой подписи 10 лет. После установки эксперт клиента и подачи пищи АС будет авторизоваться на базовой станции, используя определенную частоту радиосигнала то базовая станция, на основе перечисленных выше идентификационных данных, передает абоненту конфигурационный файл под Протокол TFTP. После процедуры аутентификации в конфигурации АС на базовой станции происходит следующим образом:

а) Абонентская станция посылает запрос на авторизацию, который содержит сертификат X.509, описание поддерживаемых методов шифрования и дополнительной информации;

б) базовая станция в ответ на запрос на получение разрешения (в случае запроса надежности) посылает ответ, содержащий ключ аутентификации зашифрованный с помощью открытого ключа абонента, 4-битным ключом для определения последовательности, необходимой для определения следующий ключ от прав, а также время жизни ключа;



в) В процессе работы АС через период, определенный администратором системы происходит повторных разрешений и проверки подлинности, а в случае успешного прохождения аутентификации и авторизации поток данных не прерывается.

В стандарте протокола ПКМ (управление ключами конфиденциальности), согласно которому некоторые виды ключей для шифрования ключа (акционерного общества) он передаваемой информации: разрешение - ключ, используемый для разрешения акционерного общества на базовая станция определяется она используется;

Traffic от шифрования ключа (Glass) - ключ, используемый для криптозащиты дороге;

Ключ шифрования ключа (КЕК) - ключ, используемый для криптозащиты ключей телекомпании. В соответствии со стандартом, в каждый момент времени используются два ключа одновременно с заблокированной время жизни.

Эта мера необходима в среде с потерями пакетов (и в воздухе они неизбежны) и обеспечивает бесперебойную работу функционирования сети. Существует большое количество динамического изменения ключей, достаточно долго, таким образом, создание безопасных соединений происходит с помощью цифровой подписи. В соответствии со стандартом, криптозащиты она осуществляется в соответствии с алгоритмом DES в 3-, таким образом, невозможно отсоединить шифрование. Шифрование на более надежного алгоритма AES является необязательной при условии[9].

На основе приведенного материала можно сформулировать основные проблемы, которые необходимо будет решить в ходе исследований, это определение наиболее подходящих типов модуляции для работы с большой скоростью пропускания, установление необходимого коэффициента дуплексной передачи для расширения полосы и нахождение наиболее удовлетворяющего размера циклического префикса для соотношения скорость качество

#### **1.4 Оценка параметров качества услуг в сетях WiMAX**

Качество обслуживания трафика в любых сетях с коммутацией пакетов определяется величинами трех основных показателей: вероятности потери пакетов (packet loss), длительности задержки пакетов в сети (latency) и вариации этой задержки (jitter). Минимизировать их призваны описанные выше технологии адаптивной модуляции и OFDM.

Таким образом доступность услуг в широкополосном доступе радио может быть оценена следующими параметрами [10]:

а) относительное число неудачных просмотров (Неудача Просмотра WiMAX - SF) - указывает на вероятность что зона обслуживания сеть WiMAX никто доступный станции подписчика родственник;

б) число неудачных попыток получить доступ к станции подписчика к сети WiMAX (Пользовательское Отношение Неудачи Доступа - UAFR) -

указывает на вероятность, что станция подписчика не может получить доступ к сети;

в) относительное число неудач связи (Отношение Неудачи - АФРИКАНСКАЯ Ассоциация) - указывает на вероятность, подписчик не может установить радиосвязь с отобранной станцией подписчика;

г), который относительное число неудачных попыток получить пароль (Поисковое Отношение Неудачи Пароля-PRFR) - показывает вероятности, что пароль, полученный подписчиком, не действителен;

д) Относительное число неудавшегося разрешения (Отношение Неудачи Разрешения - АФРИКАНСКИЙ) - показывает вероятность, что разрешение подписчика было неудачно;

е) относительное число неудачных попыток получить доступ к обслуживанию, которое SAFR (Сервисное Отношение Неудачи Доступа) - показывает вероятности, что доступ к обслуживанию был неудачен;

ж) который относительное число неудачных попыток получить доступ к RAFR (Отношение Неудачи Передоступности) - показывает вероятности, что второй доступ к базовой станции не был успешен из-за отказа сети;

з) Просмотр времени (Время, чтобы Просмотреть - TS) - время должен был искать доступную базовую станцию для сети доступа; время i) пользовательского доступа к сети (Пользовательское Время доступа-UAT) - время должно было получить доступ к сети время;

и) пользовательского доступа к обслуживанию (Сервисное Время доступа - СИДЕЛО) - время, необходимое для успешного доступа к обслуживанию;

й) попытки к перевремени доступа (Время Передоступности - КРЫСА) - время, требуемое для повторения связи с базовой станцией для доступа к установленному. Параметры Et<sub>i</sub> добавляют и определяют традиционные параметры, характеризующие качество функционирования сети и QoS включая [11]:

Минимальная избыточная скорость передачи; максимальная поддержанная скорость передачи, максимальная допустимая задержка пакета, стабильность задержки пакета, уровень приоритетного движения Другим важнейшим условием обеспечения качества обслуживания остается выделение более и менее приоритетного трафика. В WiMAX используются 5 классов обслуживания для нагрузки разного вида.

В сетях WiMAX, чтобы решить проблему обеспечения гарантируемого качества обслуживания и использовать обоим традиционный метод (максимальное усилие - БЫТЬ), и метод гарантии QoS следующего поколения. Одна из ключевой сети WiMAX, MAC функционирует, должна гарантировать что требования для единиц данных о протоколе, принадлежащих потокам данных для различных классов обслуживания и обеспечивающих возможность как возможная достоверно обеспечить сетевой груз.

Это подразумевает, что каждая связь должна выполнить определенный набор согласованных параметров сети, соединяющей все аспекты QoS, такие как задержка пакета, колебание, скорость передачи в бодах, относительное число неправильно полученных пакетов и сетевая доступность.

Так как требования к уровню качества QoS для различных информационных служб могут измениться значительно, сеть WiMAX изменила управленческие меры и транспортировку, которые встречают эти изменения. Сеть WiMAX уровня MAC использует механизм данных о приоритизации времени, чтобы поставить и управлять чиновником и единицами данных о протоколе к слою MAC в соответствии с различным качеством требований обслуживания QoS.

Механизм данных о приоритизации времени однозначно определяет механизм для сети WiMAX, используется, чтобы распределить власть сети передать данные к DL и UL для PDUs. В WiMAX сети определили, что пять классов сервисного обслуживания определяют временные приоритетные данные [12]:

а) информационная служба класса на постоянной скорости (Незапрашиваемое Обслуживание Гранта - UGS) разработана, чтобы поддержать текущие данные в режиме реального времени, которые периодически производят данные о фиксированной длине пакета, такие как T1 / E1 и VoIP. Сервисное движение - фиксированный размер предложений UGS, основанный на периодической передаче данных в реальном времени, и станция подписчика не должна подвергаться сомнению точную желаемую коммуникационную полосу пропускания, таким образом устранение перекрывания и задержки пакета, следующей из необходимой полосы пропускания, просит способности.

б) информационные службы класса передача Опроса В реальном времени (Услуги по опросу в реальном времени (rtPS)) разработанный, чтобы поддержать текущие данные в режиме реального времени, которые периодически производят пакеты видео данных MPEG (Экспертная группа Кинофильмов). Используя этот класс сервисных базовых станций сети обеспечивают возможность односторонней передачи данных с мобильной станцией, чтобы получить голоса необходимой полосы пропускания (полоса пропускания канала). Возможности предъявителя, Голосующие вообще достаточно, чтобы гарантировать удовлетворяющие требования задержки для передачи потоков данных о пакете в режиме реального времени. Этот тип обслуживания означает больше, чем стоимость необходимых информационных служб класса с постоянной скоростью и UGS более эффективная для услуг изменить сумму пакетов или наличия рабочего цикла меньше чем 100%;

в) информационные службы класса без поддержки передачи Опроса в реальном времени (Услуги по опросу не в реальном времени (nrtPS)) близко к сервисному классу rtPS за исключением того, что станция подписчика может использовать однонаправленный опрос только в uplink UL для требования

необходимой полосы пропускания. В классе обслуживания действительная возможность nrtPS однонаправленная передача данных к обзору, однако, средняя продолжительность между двумя такими передачами - несколько секунд, который несравнимо больше, чем для сервисного класса rtPS. Все станции подписчика, принадлежащие той же самой группе подписчиков, могут также просить сетевые ресурсы во время одностороннего порождения Опроса передачи данных, конфликты могут закончиться. приведение к дополнительным запросам;

г) информационные службы класса без гарантии необходимое качество ("возможный» - обслуживание максимального усилия (БЫТЬ)) оказывает очень мало поддержки для QoS и только подходит для услуг, у которых нет очень строгих требований для QoS, таких как обычное интернет-движение. Данные будут переданы, когда ресурсы будут доступны для передачи, и для передачи потребовался бы, чтобы определять приоритетный класс. Станция подписчика может просить возможность к односторонней передаче данных к обзору для необходимой пропускной способности способности;

д) продвинутые информационные службы класса, в режиме реального времени голосующие, чтобы перейти (расширенное обслуживание опроса в реальном времени (ertPS), представляют новый класс данных о приоритезации времени, только IEEE определенного стандарта 802.16e стандарт и основывались на увеличении эффективности UGS и rtPS. Передовые ertPS услуги класса проектировали, чтобы поддержать движение VoIPB этом случае каналы распределения, выстраивают в линию UL, периодически доступный для использования у только определенных станций подписчика, и может использоваться или для передачи данных, или просить для требования дополнительной полосы пропускания.

Эта особенность позволяет сервисный класс ertPS, приспособливают переданные потоки данных, которые варьируются по требованиям полосы пропускания времени. Обратите внимание на то, что в случае класса UGS обслуживания, в отличие от ertPS сервисного класса, станции подписчика позволяют просить дополнительную полосу пропускания во время распределения канала в линии, но только для составов вне класса обслуживания контроль качества UGS.Dlya в современных системах коммуникаций использовал два пересекающихся набора; качественные параметры сети и качество сервисных параметров. Поскольку контроль QoS в сети использует так называемый сервисный поток WiMAX dannyh. Поток данных Sluzhebny в сети WiMAX - транспортная служба, предоставленная слоем MAC, чтобы передать движение, выстраиваются в линию (UL) и линия "вниз» (DL), и крайне важно для архитектуры сети клетки WiMAX, поддерживая QoS. У каждого сервисного потока данных есть свой собственный уникальный набор параметров NP и QoS, таких как задержка пакета, задержка пакета и стабильность относительного числа неправильно полученных пакетов, которые определяют сетевые возможности и затраты ресурса.

Для работы различных бизнес-приложений, передачи мультимедийного трафика и т. п. недостаточно просто упаковать голосовой или видеотрафик в IP-пакеты, требуется еще обеспечить необходимый уровень для ряда других параметров. Например, для оказания голосовых и видеослужб необходимо гарантировать, что задержка пакетов, джиттер, уровень ошибок и другие параметры не будут выходить за заданные ограничения.

В сетях WiMAX, построенных по стандарту IEEE 802.16, вопросам обеспечения QoS уделяется особое внимание. При проектировании реальной сети, опираясь на практические задачи, которые она будет решать, можно произвести дифференциацию предоставляемых услуг, отобрать категории пользователей, выбрать конкретные приложения, которые критичны к качеству канала связи и требуют вполне определенного качества предоставления услуг. Поэтому в WiMAX вводятся несколько типов качества обслуживания описанные выше.

Для дифференциации сервиса и поддержания необходимого качества обслуживания в самой системе WiMAX существует специальный механизм, пришедший сюда из технологии ATM. Он называется подуровень конвергенции. Фактически он действует как программный интерфейс канального уровня к сетевому уровню сети. Он осуществляет фильтрацию общего сетевого трафика, опираясь на специальные метки, называемые классификаторами сервисных потоков.

Сервисные потоки — ключевая концепция MAC-уровня технологии WiMAX. Они создаются для однонаправленного нисходящего и восходящего трафика и отличаются друг от друга тем, что у каждого имеется свой набор заданных параметров их обслуживания, в том числе определенный тип QoS. Тем самым образуется среда, в которой успешно соседствуют и конкурируют более приоритетные сервисные потоки с менее приоритетными. Возникает эффективная система, где работают разные сервисы и для каждого из них создаются условия, необходимость которых определяется целевыми задачами возведенной сети. Дифференциация сервиса по классификаторам применяется не только для обслуживания работы устройств в сети WiMAX. Необходимый уровень QoS может быть предусмотрен для обеспечения доступа к различным сетевым и информационным ресурсам, находящимся за пределами внутренней сети оператора связи. Это обеспечивает дополнительную гибкость при настройке сети WiMAX: она не только решает свои внутренние задачи, но и направлена на эффективную работу с любыми источниками данных [13].

Основной проблемой в области гарантирования качества при проектировке сети WiMAX для предоставления услуги triple play, является точная настройка приоритетов всех передаваемых услуг, в зависимости от характеристик канала передачи данных. Так как каждая услуга требует определенных критериев в области задержки, джиттера либо потери данных.

## **1.5 Возможность передачи интерактивного телевидения в сети WiMAX**

Рассматривая, сеть WiMAX мы сталкиваемся с ограниченной полосой пропускания, поэтому зачастую для передачи Triple Play используется два оконечных абонентских устройства первое для данных и телефонии, а второе для услуги IPTV, так как полный спектр услуг интерактивного телевидения требует большой полосы пропускания. Поэтому для применения одного абонентского устройства, для передачи всех 3 услуг, необходимы хорошие радио параметры, чего очень сложно добиться в крупно населенных городах из-за большой численности абонентов и условий городской застройки и ландшафта. Но применение различных аспектов увеличения полосы пропускания сети WiMAX, может позволить в полной мере применять услуги интерактивного телевидения, одновременно с передачей данных и телефонией по сетям WiMAX.

Сеть IP-доступа WiMax обеспечивает транспортировку пакетов данных из сетей. Кроме того, радиовещание через WiMax-сеть не ухудшает качество передаваемого контента. Поскольку базовые станции WiMax-сети, абонентские пункты и мобильные станции идеально подходят при предоставлении IP-услуг, видео по запросу, IPTV, эти мультимедийные услуги удобно предоставлять через беспроводные сети MAN. При этом для WiMax возможен выбор между традиционными кабельными сетями, DSL-сетями и спутниковой связью. WiMax-сеть доступа способна передать любой необходимый контент повсеместно.

Наконец, развитие WiMax-сетей позволяет доставлять IPTV-видео и IPTV-аудиоконтент высокого качества с приемлемой стоимостью в сельскую местность и районы, ранее недоступные для обслуживания. Модель системы для IPTV-приложений приведена на рисунке 1.7. Видеосерверы хранения аудио и видеоконтента живой эфир и предварительно записанные программы выполняют кодирование и сжатие. Видеосерверы (декодеры) являются централизованными либо распределенными в основной сети.

В настоящее время широкое распространение получила передача видео по запросу через одноадресную IP-сеть. На первый взгляд одноадресная передача с помощью VoD-сервера не вызывает затруднений при достаточной пропускной способности сети или низкой интенсивности входящего потока запросов обслуживания.

Однако реально видео запросы поступают не столь равномерно, поэтому нередко возникает скопление запросов на получение одного и того же контента, а в ряде случаев – всплеск запросов. Такие ситуации крайне неблагоприятны для серверов одноадресной передачи (unicast transmission servers) поскольку емкость сервера ограничена его конфигурацией, что приводит к высокой вероятности блокировки сервиса. Многоадресная рассылка часто запрашиваемого видео многочисленным получателям и одноадресная рассылка менее популярного видео позволяют уменьшить вероятность блокировки сервиса[14].

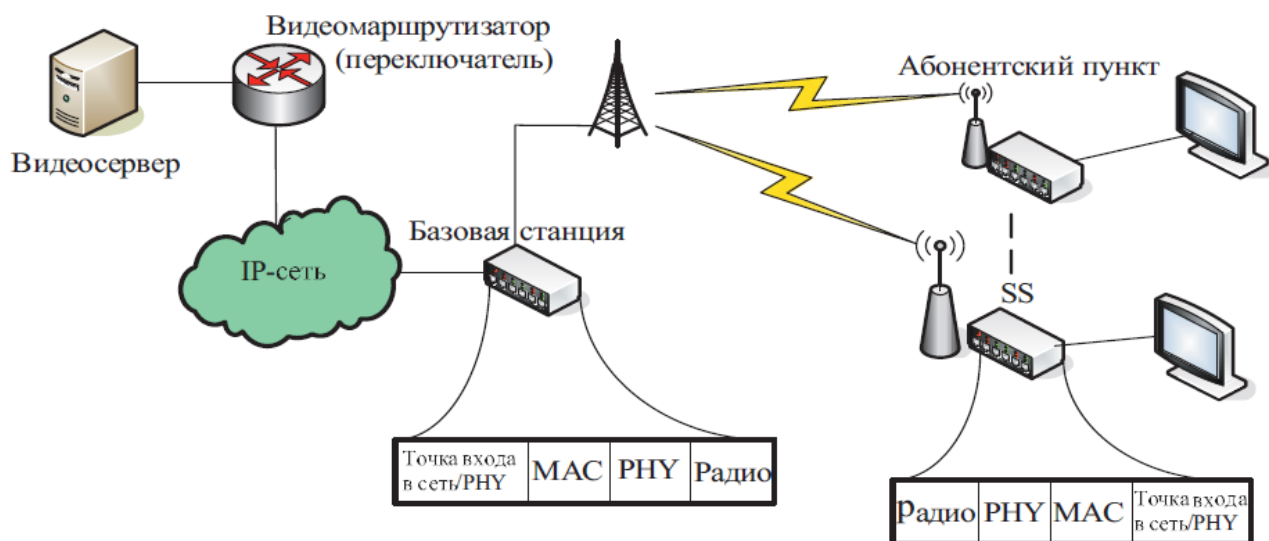


Рисунок 1.7 – Модель системы для IPTV - приложений

Для обслуживания значительного числа клиентов необходимо эффективно использовать ресурсы нисходящей передачи информации. Ранее предложенная схема многоканальной многоадресной передачи базировалась на скоростном радиовещании, реализованном с использованием среды кабельного телевидения подобно VoD-сервису. В отличие от телевизионного вещания поток IP-телевидения не может передаваться на всем Интернет-пространстве, поэтому для предоставления часто запрашиваемого контента многочисленным потребителям и обеспечения эффективного способа передачи разнообразного мультимедийного потока пользователям используется многоканальная передача.

Выбор контента, который будет передан с помощью многоканальной многоадресной технологии, осуществляется с использованием предложенного метода адаптивного распределения ресурсов, имеющего минимальную вероятность блокирования. WiMax поддерживает как одиночные базовые станции, так и множество базовых станций широкополосного доступа. В режиме MBS для передачи данных используется одночастотная сеть.

В режиме с множеством BS MBS не требуется, чтобы мобильная станция абонента была прикреплена к какой-либо базовой станции. Для уменьшения расхода энергии MBS получает доступ к MSS, когда станция находится в нерабочем режиме. Возможность использования мобильной WiMax-системы при интеграции MBS и одноадресных сервисов позволяет расширить область ее применимости.

Рабочая группа WiMAX Forum сети (НРГ) разрабатывает более высокого уровня сетевые характеристики для систем Mobile WiMAX за то, что определяется в IEEE 802.16, который просто обращается к спецификации радиointерфейса. Совместными усилиями IEEE 802.16 и WiMAX Forum

помощью определить конец-в-конец системное решение для сети Mobile WiMAX.

Системы мобильного WiMAX предлагают масштабируемость технологии, так радиодоступа и сети архитектура, обеспечивая тем самым большую гибкость в вариантах развертывания сети и предложения по обслуживанию. Некоторые из основных функций, поддерживаемых Mobile WiMAX являются:

Высоко- данных ставок: Включение методов MIMO антенн с гибкой вместе схемы суб-каналообразующие, Расширенный кодирование и модуляция все включить Технология Mobile WiMAX, чтобы поддержать пиковые скорости передачи данных DL до 63 Мбит в секторе и пиковые скорости передачи данных UL до 28 Мбит в секторе в канале 10 МГц.

Качество обслуживания (QoS): Основная предпосылка IEEE 802.16 MAC архитектура QoS. Он определяет потоков услуг, которые можно поставить в DiffServ кодовых точек или MPLS метки потока, которые позволяют QoS на основе конца в конец IP. Кроме того, на подканалы и схемы сигнализации на основе MAP-обеспечивают гибкий механизм для Оптимальное планирование пространства, частоты и временных ресурсов по интерфейсу воздуха на кадр за кадром.

Несмотря на все более и более глобальной экономики, спектр ресурсов для беспроводной широкополосный во всем мире по-прежнему довольно разрозненных в его распределении. Мобильный Технология WiMAX, поэтому, разработан, чтобы быть в состоянии в масштабе для работы в различных каналов от 1,25 до 20 МГц соблюдать требования различных по всему миру, а усилия приступить к гармонизации спектра достичь в долгосрочной перспективе. Это также позволяет диверсифицированной экономикой, чтобы понять многогранные преимущества Mobile WiMAX Технология для своих конкретных географических потребностей, таких как обеспечение доступным Интернет доступ в сельской местности по сравнению с укрепления потенциала мобильного широкополосного доступа в метро и пригородных районах.

Потребительские свойства iTV на базе технологии IPTV открывают перед пользователями практически неограниченные возможности в просмотре видеоконтента. Дополнительно для абонента становятся доступны и многие другие сервисы, подобные тем, с которыми он знаком как пользователь Интернета: посещение телемагазинов; участие в форумах и чатах; отправление SMS-сообщения; хранение персональной информации.

Таким образом, для предоставления услуги IPTV в сетях WiMAX необходимо применение различных технологий по оптимизации полосы пропускания путем улучшения радио параметров: адаптивная модуляция и мультиплексирование поортогональным несущим, и путем присвоения различных приоритетов QoS.



Подвергнув анализу весь представленный материал и рассмотрев все основные проблемы при проектировке сети беспроводного широкополосного доступа на основе стандарта WiMAX, для предоставления мультимедийных услуг tripleplay можно сформировать цель и основные задачи исследования. Целью диссертационной работы является доказательство возможности построения сети WiMAX в мегаполисах для предоставления услуги tripleplay. В рамках сформулированной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

- исследовать статистический характер используемых видов модуляций способных поддерживать заданную скорость без ухудшения качественных показателей канала при передаче услуги tripleplay;
- оценить полученные уровни задержки и потенциальную пропускную способность при передаче услуги TP на разных типах модуляции;
- определить наиболее подходящие классы приоритезации трафика для услуг входящих в tripleplay;
- получить значение максимальной пропускной способности канала WiMAX, а также максимальную полосу пропускания БС;
- разработать рекомендации для улучшения качества передачи услуги tripleplay по сети WiMAX.

## **2 Исследование возможности построения сети WiMAX для предоставления мультимедийных услуг**

### **2.1 Экспериментальное исследование статистического характера адаптивной модуляции**

В стандарте IEEE 802.16d реализованы технологии для предоставления качественных и высокоскоростных мультимедийных услуг, это использование адаптивной модуляции, разделение трафика по приоритетам QoS, применение мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Кроме этого сети WiMAX определяют применение на физическом уровне широкополосного шумоподобного радиосигнала с кодовой модуляцией OFDM. На канальном уровне используется современная технология множественного доступа TDMA. На сетевом уровне в сетях WiMAX используется IP протокол передачи данных[16].

Для предоставления услуги triple play необходимо наличие канала с большой пропускной способностью, так как в одном физическом канале будут передаваться сразу три информационных сигнала в IP среде. Возможность предоставить абоненту такую скорость будет зависеть от показателей отношения сигнал/шум CINR и уровня принимаемой мощности RSSI, так как именно эти параметры определяют работу того или иного вида модуляции и как следствие максимально допустимую скорость передачи.

При предоставлении услуг где, необходима малая полоса пропускания адаптивная модуляция позволяет добиться гарантированного качества услуг,

но при передаче услуг с большой пропускной способностью некоторые виды модуляции могут не поддерживать установленную скорость, вследствие чего может увеличиться задержка. Целью данного эксперимента является исследование статистического характера используемых видов модуляций способных поддержать заданную скорость без ухудшения качественных показателей канала при передаче услуги triple play.

Адаптивная модуляция позволяет системе WiMAX приспосабливать схему модуляции сигнала в зависимости от уровня отношения сигнал-шум в радиоканале. Если радиоканал имеет высокое качество, то используется самая высокая схема модуляции, давая системе дополнительную емкость. С затуханием сигнала, система WiMAX может изменить схему модуляции на более помехоустойчивую, чтобы поддержать качество обслуживания и стабильность канала. Поэтому в целях сохранения емкости базовой станции и увеличения количества абонентов необходимо добиваться хороших показателей сигнал-шум, тем самым обеспечивая более высокую схему модуляции. Но в процессе эксплуатации значение CINR может изменяться в связи с действием атмосферных, космических или промышленных помех [8]. Эксперимент проводился с помощью оборудования Iskratel SI3000 WiMAX, технические характеристики которого представлены в таблице 2.1, на частоте 3,3 ГГц, с полосой пропускания 7 МГц и установленной скоростью передачи 7 Мбит/с.

Программное обеспечение «Harris Stratex WiMAX Network Management» предназначенное для управления, сбора и регистрации статистических данных было выбрано по рекомендациям производителя оборудования Iskratel.



Рисунок 2.1- Топология элементов сети WiMAX на территории бассейна ЦСКА

Положение базовой станции обеспечивает широкую зону покрытия защищенной сети.

Ключевые факторы успеха использования WiMAX сети в данном решении:

- стратегическое местоположение на пересечении наиболее оживленных магистралей города – Розыбакиева - Абая .
- близость объекта к целевой аудитории – Алмалинский район с населением 400 000 человек по итогам 2014-2015 годов занял первое место по социально-экономическому развитию;
- хорошая транспортная доступность (10 минут на автотранспорте от центра города, свыше 15-ти маршрутов городского общественного транспорта).

### Адаптивная модуляция

Мощное ядро WiMAX динамически оптимизирует все беспроводные соединения в пределах заданной ячейки. Исходя из текущих условий распространения сигнала, каждому соединению назначается наиболее оптимальный тип модуляции, что способствует повышению общей пропускной способности ячейки и гарантирует эффективное использование радио интерфейса. Механизм адаптивной модуляции гарантирует оптимальное использование доступных ресурсов. [3]

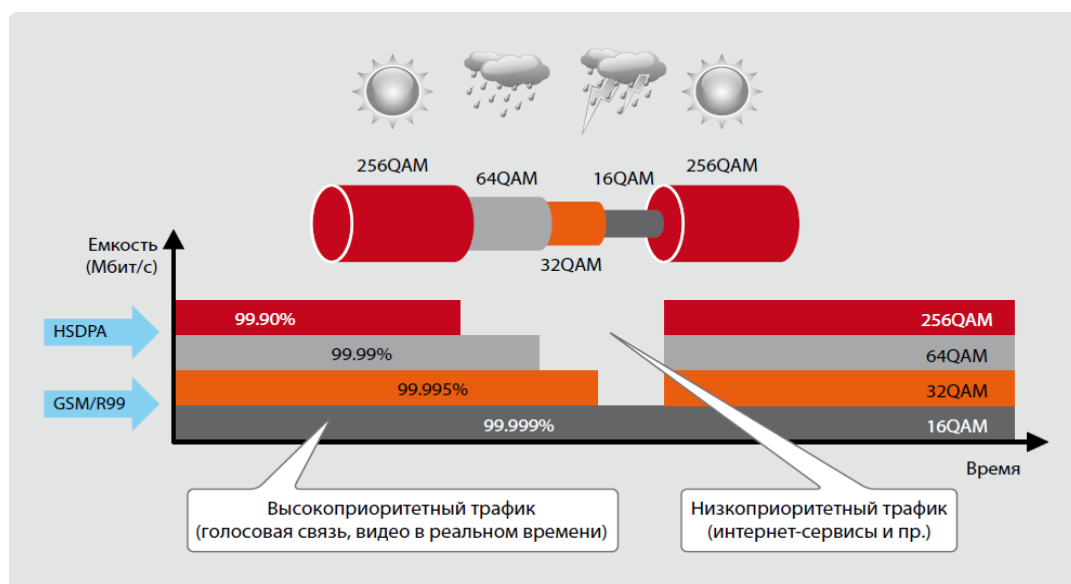


Рисунок 2.2 - Механизм адаптивной модуляции

На рисунке 2.3 показана дальность уверенного приема абонентской станции WiMAX для частот диапазона 26 ГГц, при которой абонент будет получать соответствующую скорость.

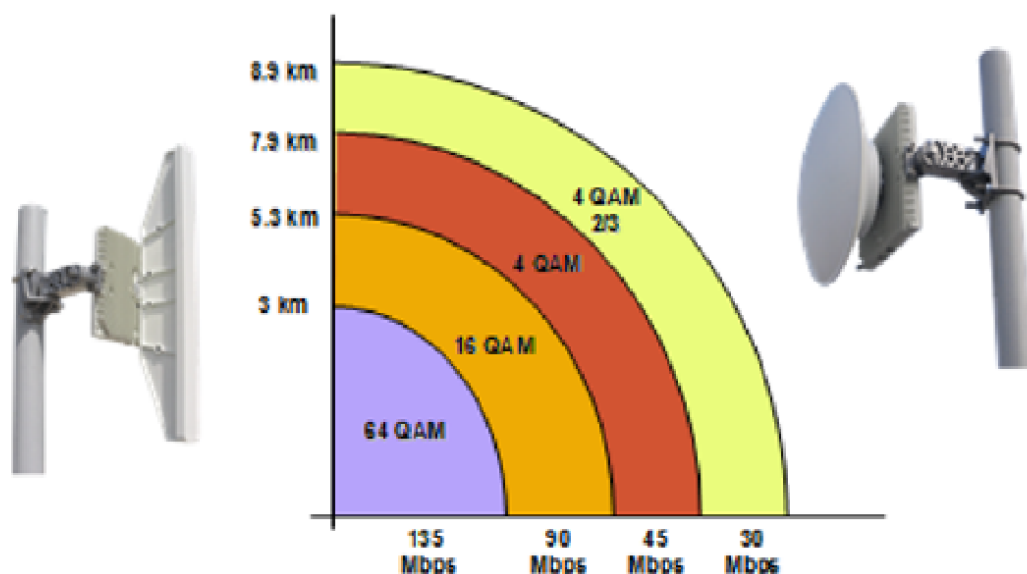


Рисунок 2.3 - Дальность связи и скорость передачи данных в диапазоне 26 ГГц

Таблица 2.1 – Технические характеристики базовой станции Iskratel SI3000 Wimax[17]

Параметр	Значение
Диапазон частот, МГц	3300-3400
Шаг установки, кГц	125
Метод дуплексной передачи	TDD
Метод множественного доступа	TDMA
Модуляция	ODFM, 256 FFT с адаптивной модуляцией поднесущих: BPSK-1/2, QPSK-1/2, QPSK-3/4, QAM16-1/2, QAM16-3/4, QAM64-2/3, QAM64-3/4
Соответствие стандартам радиointерфейса	IEEE 802.16-2004 OFDM 256FFT
Полоса пропускания, МГц	7
Длина кадра, мс	10
Максимальная выходная мощность на антенном разъеме, дБм	30
Минимальная выходная мощность на антенном разъеме, дБм	20
Шаг регулировки выходной мощности, дБ	1
Максимальное число потоков обслуживания	8 независимых потоков обслуживания на абонентскую станцию
Приоритеты QoS	До 16 классификаторов на абонентскую станцию
QoS WiMAX	BE, Nrt-PS, Rt-PS, UGS, Ert-PS

Коэффициент усиления антенны, дБи	16
Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости	90°
Диаграмма направленности в вертикальной плоскости	7°
Поляризация	Вертикальная

Диаграмма направленности антенны базовой станции представлена на рисунке 2.4. Iskratel рекомендует использовать с базовой станцией, антенны производства компании Laird TECHNOLOGIES. Была выбрана антенна J33015V01-90N, особенностями выбранной антенны являются малые боковые лепестки, что крайне важно в условиях проектировки городской сети, возможность установки угла места, устойчивая работа. Абонентская станция StarMAX 2160 выбрана производства Aviat networks, с диаграммой направленности в горизонтальной плоскости 15°, коэффициентом усиления антенны 15 дБи и максимальной выходной мощностью на антенном разьеме 24дБм [17].

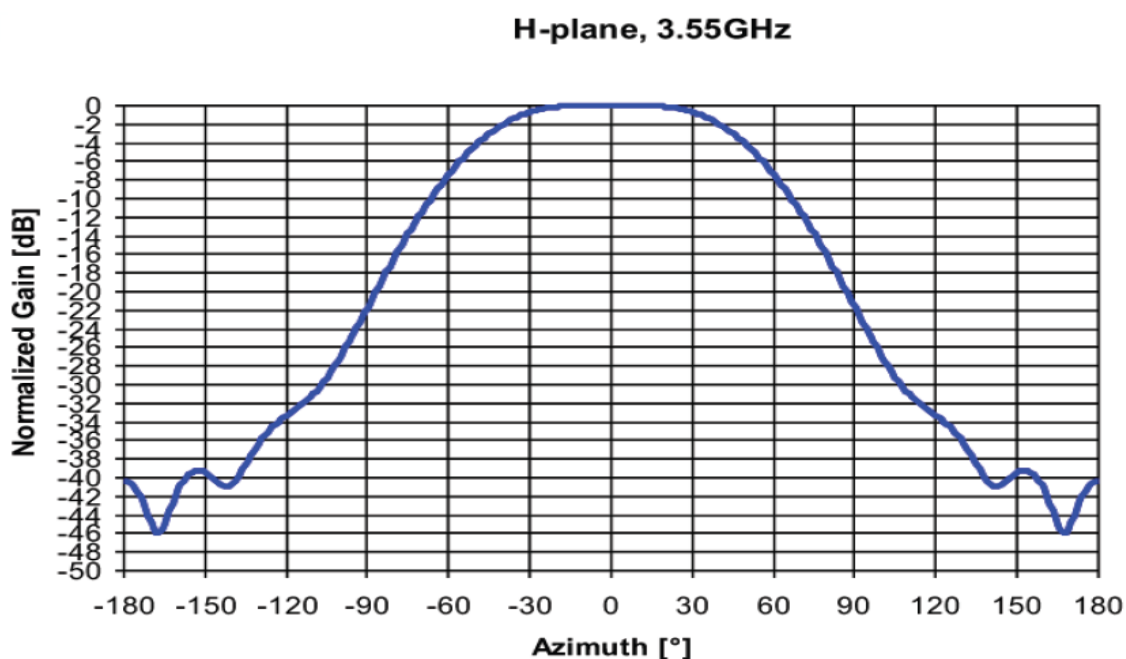


Рисунок 2.4 – Диаграмма направленности антенны базовой станции

Использовалась секторная антенна с вертикальной поляризацией и диаграммой направленности 90°, предназначенная для работы в диапазоне 3,3-3,8 ГГц.

На рисунке 2.5 представлена типовая схема подключения абонентов, с основными элементами базовой станции WiMAX, а также необходимым абонентским оборудованием для приема услуги triple play.



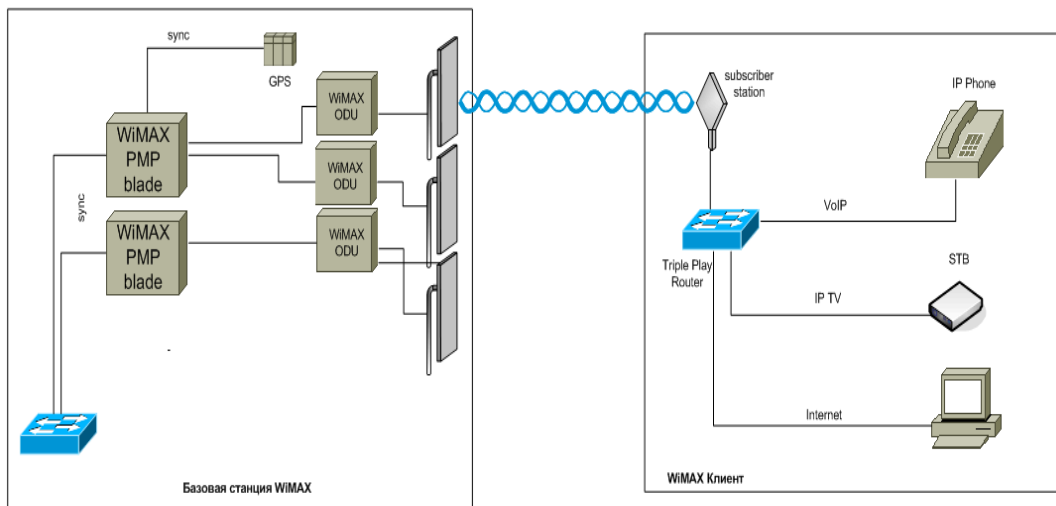


Рисунок 2.5 – Типовая схема подключения клиентов

На рисунке 2.5 показано, что в конструкции базовых станций серии SI3000 WiMAX применен принцип модульности и разделения на блок внутреннего исполнения (IDU) и блок внешнего исполнения (ODU), где внутренний блок оборудован слотами для установки модуля PMP (точка – группа точек), это необходимо для лучшей масштабируемости сети, а также разделения функций базовой станции между различными блоками. Использование модуля GPS необходимо для WiMAX, использующего временной дуплекс (TDD) синхронизация — очень важный вопрос, поскольку время приёма/передачи должно быть синхронизировано как для разных секторов одной БС, так и для других базовых станций, являющихся соседними для рассматриваемой. На абонентской стороне для предоставления услуги triple play, необходимо устанавливать многопортовый маршрутизатор и соответствующие каждой услуге оборудование.

Для наглядного представления используемого сигнала, на рисунке 2.6 приведен спектр OFDM радиосигнала на частоте 3,3 ГГц.

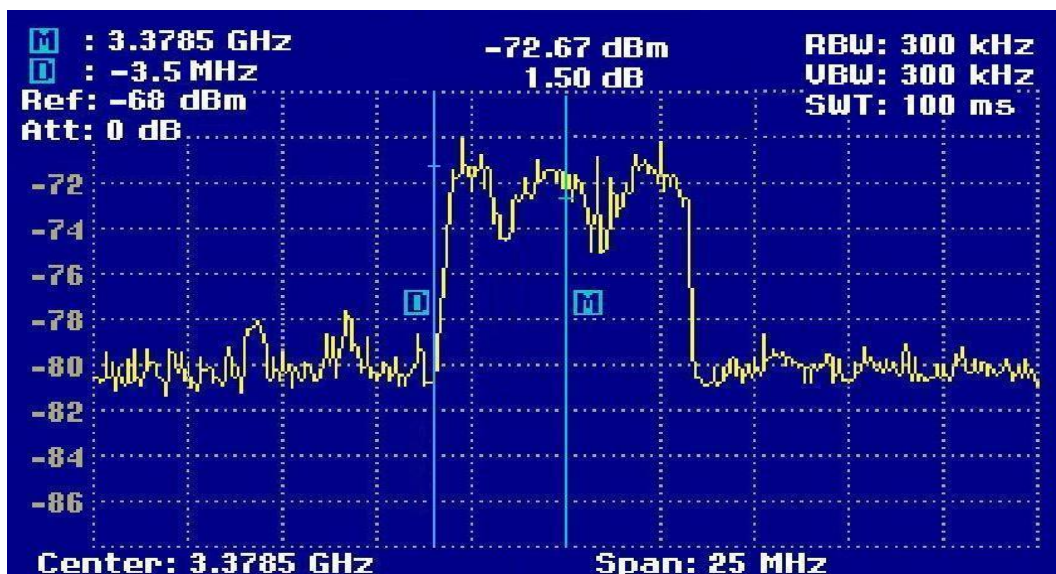


Рисунок 2.6 - Спектр OFDM радиосигнала на частоте 3,3 ГГц

Из рисунка 2.6 видно, что используется OFDM сигналмножеством поднесущих, с полосой пропускания 7 МГц.

Для исследования статистического характера адаптивной модуляции и определения видов модуляций способных поддержать заданную скорость без ухудшения качественных показателей канала при передаче услуги triple play, исследовался канал передачи данных в течении суток, наиболее важной характеристикой для анализа будет являться отношение сигнал-шум на линии «вниз»(DL) представленный на рисунке 2.7.

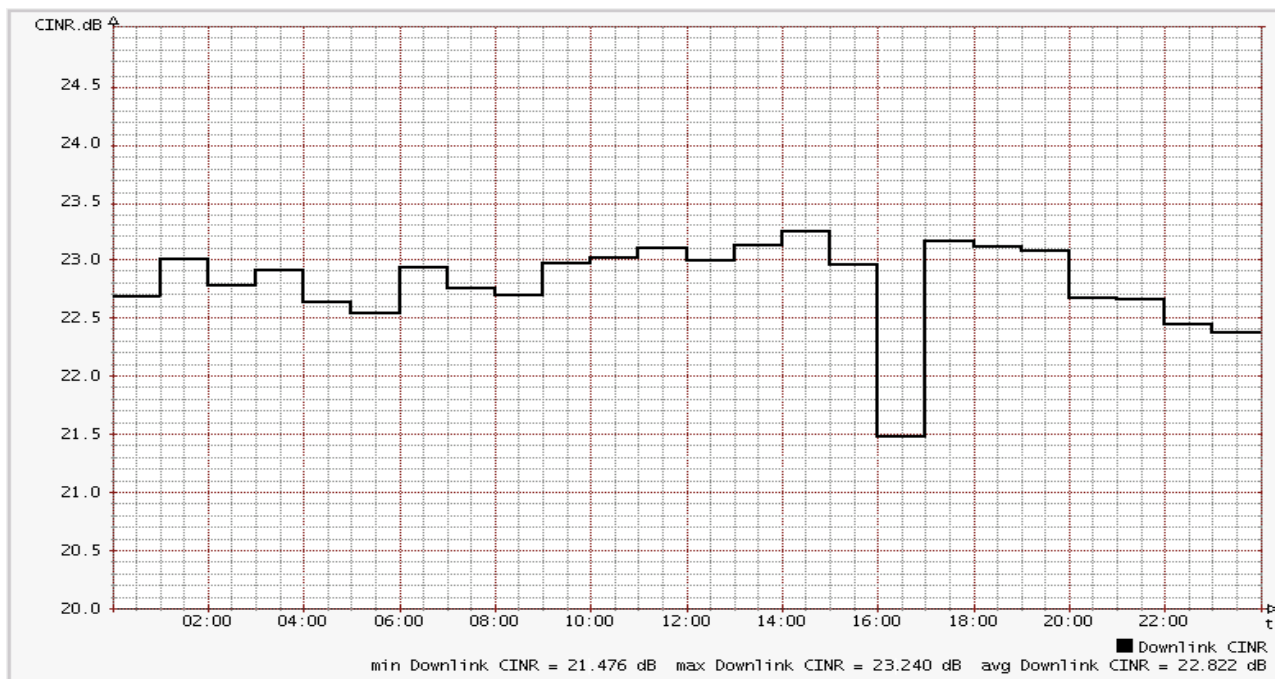


Рисунок 2.7 – Изменение значения CINRDL в течение суток

Из рисунка 2.7 видно, что среднее значение CINRDL в течение суток составляет 22,822 дБ, и соответствует нормам модуляции 64QAM 3/4. Но в промежутке времени начиная с 16:00 наблюдается, значительный спад отношения сигнал-шум до 21,476 дБ, этому спаду соответствует момент переключения на более надежный, но менее эффективный вид модуляции 16QAM 3/4.

В таблице 2.2 приведены отношения сигнал/шум необходимые для максимально допустимого уровня битовой ошибки равной  $BER=10^{-6}$  (процент приема ошибочных бит информации не более 0,005%) и возможные скорости передачи при использовании того или иного вида модуляции определенные стандартом IEEE 802.16d [18, 19].

Таблица 2.2– Основные характеристики адаптивной модуляции

Модуляция	Скорость передачи, Мбит/спри ширине полосы канала, МГц						Сигнал-шум, дБ
	1,75	3,5	7	3	5,5	10	
BPSK 1/2	0,7	1,5	2,9	1,3	2,3	4,2	5-10
QPSK 1/2	1,5	2,9	5,8	2,5	4,6	8,4	7-12
QPSK 3/4	2,2	4,4	8,7	3,8	6,9	12,6	10-15
16QAM 1/2	2,9	5,8	11,6	5,0	9,2	16,8	13-18
16QAM 3/4	4,4	8,7	17,5	7,5	13,8	25,1	16-22
64QAM 2/3	5,8	11,6	23,3	10,0	18,3	33,5	21-24
64QAM 3/4	6,5	13,1	26,2	11,3	20,6	37,7	22-40

Исходя из таблицы 2.2, в рассматриваемый промежуток времени доступная полоса пропускания базовой станции понизится, но при этом гарантии качества для абонентов сохранятся, не смотря на ухудшение энергетических показателей канала, так как модуляция 16QAM 3/4 способна поддержать установленную скорость. На рисунке 2.8 представлено изменение значения задержки сигнала рассматриваемого канала.

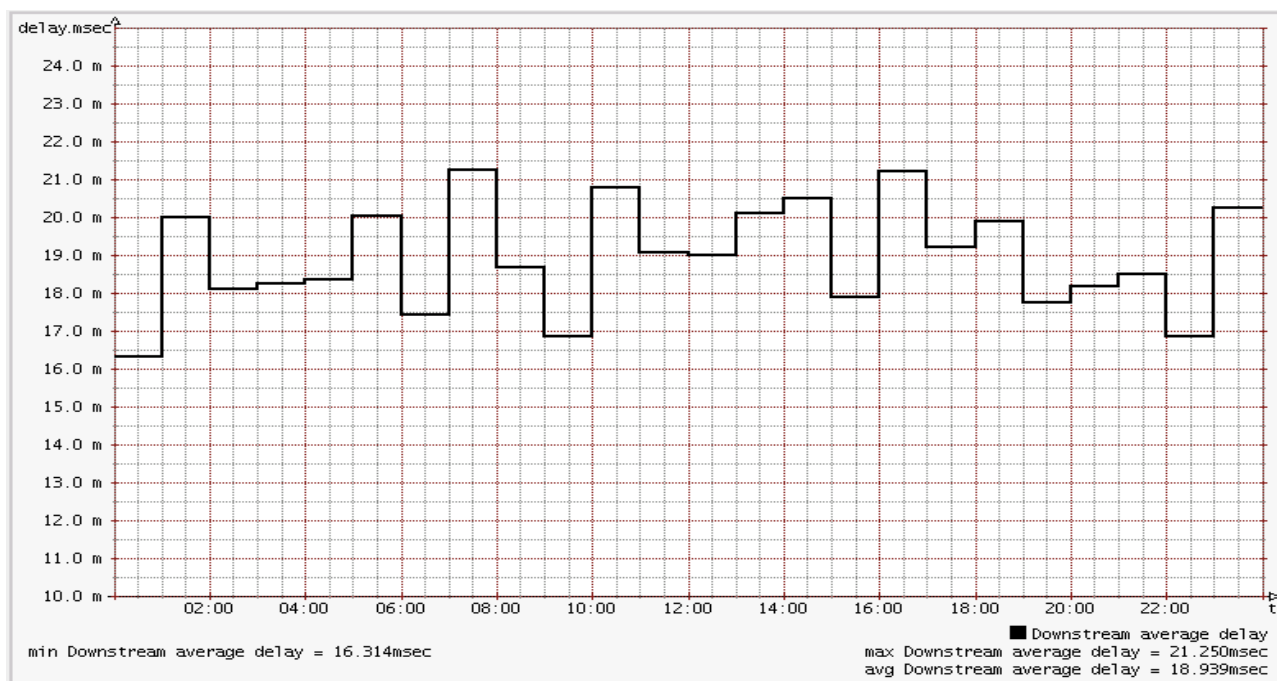


Рисунок 2.8 – Изменение значения задержки сигнала в течение суток

Из рисунка 2.8 видно что, в момент переключения на модуляцию 16QAM3/4 (момент времени 16:00), задержка составляет 21,21 мс, что соответствует среднему уровню задержки на модуляции 64QAM 3/4 и меньше максимально допустимой задержки для передачи видео трафика в 50мс. Полученные уровни задержки для 16QAM 3/4 и 64QAM 3/4 являются не критичными, вследствие того, что используемые виды модуляции способны



поддерживать установленную скорость. Но при дальнейшем ухудшении энергетических параметров системы и в результате использования менее спектрально эффективных видов модуляции произойдет снижение скорости передачи и существенно возрастет задержка. В таблице 2.3 приведены размеры передаваемых блоков данных различных модуляций, определяющих возможную скорость передачи.

Таблица 2.3 – Схемы кодирования и модуляции в OFDM[20]

Тип модуляции	Размер блока данных до кодирования, байт	Суммарная скорость кодирования	Размер блока данных после кодирования, байт
BPSK	12	1/2	24
QPSK	24	1/2	48
QPSK	36	3/4	48
16-QAM	48	1/2	96
16-QAM	72	3/4	96
64-QAM	96	2/3	144
64-QAM	108	3/4	144

Рассмотрим показатель задержки при работе с модуляцией QPSK 3/4. На данной модуляции базовая станция способна поддерживать общую заданную скорость в 7 Мбит/с, но по причине использования большего количества поднесущих и увеличения трансляции на одного абонента, задержка при передаче будет гораздо выше, чем при использовании модуляций QAM. На рисунке 2.9 показано отношение сигнал-шум на линии «вниз», при искусственном ухудшении параметров радиосигнала.

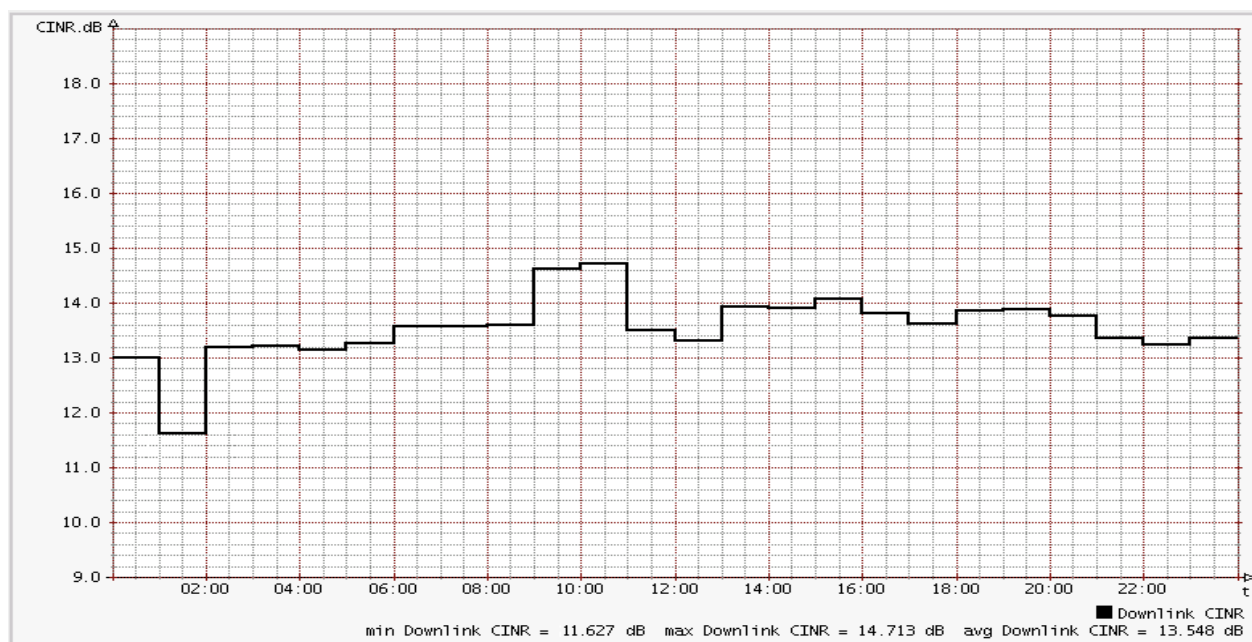


Рисунок 2.9 - Изменение значения CINRDL в течение суток при искусственном ухудшении параметров радиосигнала

Из рисунка 2.9 видно, что средний уровень значения CINRDL в течение суток составил 13,548 дБ, что соответствует модуляции QPSK 3/4, и максимально и минимальное значение CINR также не выходит за пределы отношения сигнал-шум для данного вида модуляции. Рассмотрим изменение значения задержки в течение суток при использовании модуляции QPSK 3/4 показанного на рисунке 2.7.

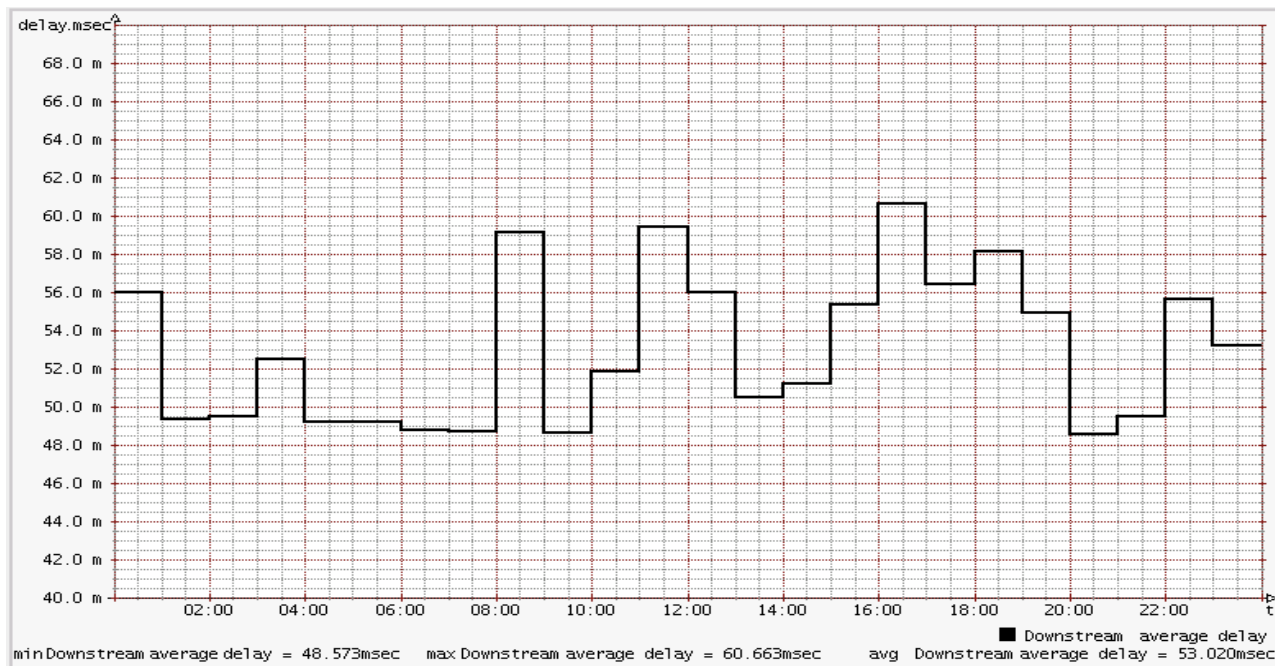


Рисунок 2.10 - Изменение значения задержки в течение суток при использовании модуляции QPSK 3/4

Из рисунка 2.10 видно, что средний уровень задержки при использовании модуляции QPSK 3/4 составил 53,020 мс, что больше максимально допустимого уровня задержки для передачи видео трафика. Таким образом, использование данного вида модуляции для предоставления услуг triple play является крайне не желательным.

Таким образом, можно сделать следующие выводы - при использовании модуляции 64QAM 3/4 уровень задержки меньше чем при модуляции 16QAM3/4, и значительно меньше, чем при QPSK 3/4. При этом полученное значение задержки при использовании модуляции QPSK превышает максимально допустимый уровень задержки для передачи видео трафика.

Поэтому для предоставления высококачественных услуг необходимо использовать наиболее спектрально эффективные типы модуляций QAM, а при подключении нового оборудования необходимо учитывать, что энергетические параметры канала могут изменяться с течением времени, воздействуя на работу всей системы.

Для предотвращения подобных ситуаций необходимо изменить запас на замирования для переключения модуляций, тем самым стабилизировав работу

системы. Так же для создания дополнительной пропускной способности БС, в случае перехода на низкий тип модуляции, рекомендуется изменить значение TDDв сторону нисходящего канала, так как требования к скорости DL выше, чем для канала UL.

## 2.2 Анализ качества предоставления услуги triple play в сети WiMAX

Система показателей качества услуг передачи данных в сетях WiMAX базируется как на показателях QoS для услуг сетей IP, так и показателях для других услуг связи в сетях с пакетной передачей VoIP, VPN, IPTV. И должна отражать удовлетворенность требований абонентов к данным услугам, а также включать в себя ряд требований к техническим и нетехническим параметрам качества услуг [21].

Для управления качеством в современных сетях связи используются два пересекающихся множества: параметры качества функционирования сети и параметры качества услуг Quality of Service. Для управления QoS в сети WiMAX используется так называемый служебный поток данных Service Flow. Служебный поток данных в сети WiMAX является транспортной службой MAC уровня предоставляемой для передачи трафика в линии "вверх" UL и в линии "вниз" DL и является ключевым в элементах архитектуры сети WiMAX, поддерживающих QoS. Каждому служебному потоку данных соответствует свой уникальный набор параметров NP и QoS, таких как задержка пакетов, стабильность задержки пакетов и относительное число ошибочно принятых пакетов, которые определяют сетевые возможности и затраты ресурсов[11]. Требования к параметрам качества функционирования для различных классов услуг в сети WiMAX приведены в таблице 2.4, и они являются определяющими для параметров QoS[22].

Таблица 2.4 – Требования к параметрам качества для различных услуг WiMAX

Параметры качества функционирования	Услуги в сетях WiMAX			
	Речь	Потоковое медиа	Данные	Видео
Вид поддерживаемой услуги	VoIP	Музыка, речь, Видео клипы	Web поиск, e-mail, загрузка файлов	IPTV, загрузка фильмов,
Потери пакетов	< 1%	< 1% для аудио; < 2% для видео	Нет	< 8%
Изменение времени задержки	< 20 мс	< 2 с	Не приемлемо	< 2 с

Время задержки	< 100 мс	< 250 мс	Гибкое	< 100 мс
----------------	----------	----------	--------	----------

В таблице 2.4 указаны необходимые параметры передаваемого трафика для качественного предоставления услуг по сети WiMAX.

В предыдущем разделе рассматривался канал передачи данных с установкой для разного типа трафика разного значения QoS. Для передачи данных устанавливалось значение BestEffort, для телефонии Unsolicited Grant Service, а для IPTV The real time polling services, и после чего снимались значения задержки в канале связи. Но возможна установка всем трем услугам одинакового приоритета, что приведет к установлению одинакового значения задержки и потери пакетов для каждого вида услуги. В отличие от выбранных приоритетов где, в зависимости от вида трафика, были установлены максимальные значения задержки и потери пакетов.

Установим всем трем услугам приоритет QoS Unsolicited Grant Service предназначенный для VoIP без подавления пауз, то есть с гарантированием значения задержки пакетов и стабильностью задержки. Проведем измерение задержки, вариации задержки и потери пакетов при модуляции 64QAM  $\frac{3}{4}$  с помощью программного продукта «Harris Stratex WiMAX Network Management», и сравним с результатами, полученными при установлении каждой услуге своего приоритета. Полученные данные занесем в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Качественные показатели канала передачи WiMAX

Канал	Средняя задержка, мс	Макс. задержка, мс	Джиттер, мс	Потери пакетов
1 Мб/с BE+6 Мб/с RtPS+ +64 Кб/с UGS	18,939	21,25	2,01	0,08
7 Мб/с UGS	17,024	23,137	3,228	0,166

Как видно из таблицы 2.5 при использовании только приоритета UGS предназначенного для VoIP, среднее значение задержки уменьшилось, хотя незначительно выросли уровни максимальной задержки и джиттера, но все же все параметры находятся на допустимом уровне для всех видов трафика в услуги tripleplay. Так же можно заметить, что более чем в два раза выросло значение потери пакетов, это связано с тем, что для передачи данных использовался другой протокол транспортного уровня за место TCP, был использован UDP. И хоть значение потери пакетов также меньше максимально допустимого уровня для передачи данных и интернета, тем не менее, для этой услуги необходимо использовать соответствующий вид приоритета трафика Best Effort.

Полученные данные можно проверить, сравнив их с исследованием по оценке пропускной способности и качества канала связи RTP в условиях LOS и near LOS на оборудовании MAX Bridge 50 Fixed WiMAX 802.16-2004. В

отличии от услуги triple play, в данном исследовании применяется только телефонии и передача данных. Оценка параметров канала связи проводилась программой Iperf. На оборудовании фиксированного WiMAX MAXBridge BS 50 Pico были проведены два теста:

а) UDP (VoIP G.711) и 2 Мб/с дуплекс TCP трафик имитация FTP были разделены поразным Service Flow (SF).. Трафик VoIP (UDP) подавался в SF с качеством обслуживания QoS UGS CIR 6 Мб/с, а 2Мб/с дуплексный TCP трафик в SF с QoS Best Effort. При этом UDP трафик имел высокоприоритетное обслуживание;

б) UDP (VoIP G.711) и 2 Мб/с дуплекс TCP трафик подавались в одном SF с классом обслуживания UGS, CIR 10 Мб/с. При этом UDP трафик не имел приоритетного обслуживания по отношению к TCP.

При тестировании измерялись следующие параметры канала связи:

- пропускная способность канала связи;
- задержка в канале delay;
- колебание задержки jitter;
- потери пакетов lost data;
- значение MOS – обобщенный показатель качества канала при передаче

VoIP трафика.

Испытания проводились в канале RTP при модуляции 64QAM  $3/4$ .

В таблице бприведены сводные значения характеристик качества канала связи, построенного на оборудовании Fixed WiMAX MAXBridge 50 на мультисервисном VoIP + FTP трафике[23].

Таблица 2.6 - Характеристики качества канала связи

Канал	MOS Average	Delay Average, мс	Delay Max, мс	Jitter Average, мс	Percent Bytes Lost
VoIP UGS 6Mbps + 2 Мб/с FTP BE	4,38	12	16	1,247	0,141
VoIP + 2 Мб/с FTP UGS 10 Мб/с	4,37	12	18	3,837	0,179

Как видно из таблицы 2.6оборудование фиксированного WiMAX при передаче мультисервисного трафика VoIP плюс 2 Mbps FTP дуплекс обеспечило значения среднего MOS 4,38 стабильные значения задержки 12 мс, максимально 16 мс, и колебание задержки 1.247 мс. При использовании одного приоритета QoS, как для телефонии, так и для передачи трафика TCP, параметры канала незначительно ухудшились, максимальная задержка выросла на 2 мс, а потери пакетов на 0,038 это связано с тем, что приоритет телефонии был равен приоритету передачи данных[24]. И таким образом мы получили ухудшения и параметра задержки настолько важного для передачи

качественной телефонии и параметра потери пакетов необходимого для гарантированной передачи данных.

### 2.3 Определение максимальной пропускной способности используемых видов модуляции

Анализируя полученные в прошлом разделе результаты можно прийти к выводу, что не каждый из видов модуляции используемый в стандарте IEEE 802.16d способен поддержать установленную скорость, без ухудшения качественных показателей канала при передаче услуги triple play. Но в случае увеличения абонентов скорости передачи данных или приобретением еще одного телефонного номера, задержка может превысить максимально допустимый уровень, в том числе и для рекомендованных видов модуляции. Поэтому встает вопрос об экспериментальном определении максимальной пропускной способности канала при использовании разных видов модуляции.

Измерение пропускной способности будет осуществляться путем подключения двух абонентских комплектов WiMAX и настройки их на одинаковый уровень CINR. Замер общей скорости канала будет проводиться с помощью программного продукта iperf, который является генератором TCP и UDP трафика для тестирования пропускной способности сети. Таким образом, на компьютере подключенному к первому абонентскому комплекту установлен iperf сервер, а на втором соответственно iperf клиент, как показано на рисунке 2.11.

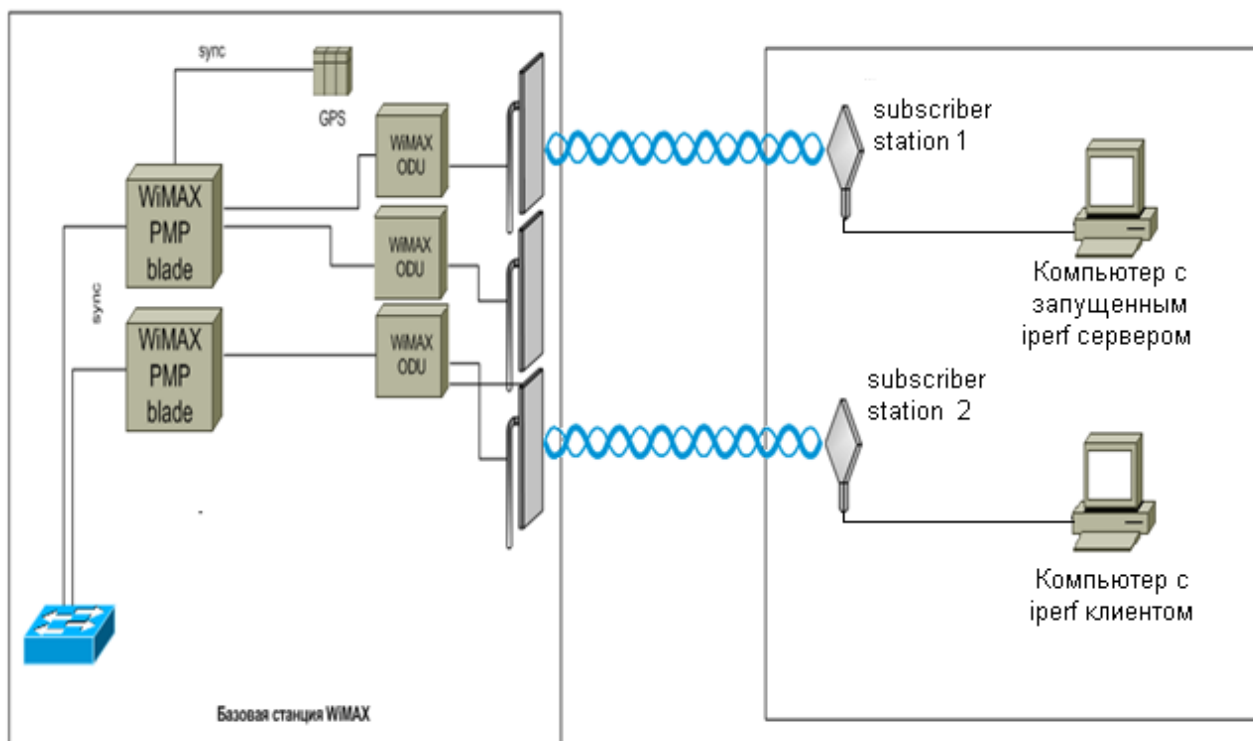


Рисунок 2.11 – Схема определения пропускной способности



На рисунке 2.11 приведена схема определения пропускной способности сети WiMAX, с использованием двух абонентских комплектов. В рабочих характеристиках оборудования представлены опорные уровни пропускной способности, поэтому будет целесообразно сравнивать полученные данные с данными производителя. Для тестирования был выбран протокол TSPc размером пакета 1514 байт, длиной кадра 10 мс, CP=1/16 и соотношением TDDDL:UL 60:40, по причине более высокого требования к скорости нисходящего канала. Окно программы тестирования полосы пропускания при модуляции 16QAM3/4 показано на рисунке 2.12.

Interval	Transfer	Bandwidth	Jitter	Lost/Total Datagrams
40.0-41.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.281 ms	147/ 1022 (14%)
41.0-42.0 sec	1.20 MBytes	10.1 Mbits/sec	1.772 ms	156/ 1011 (15%)
42.0-43.0 sec	1.18 MBytes	9.93 Mbits/sec	1.670 ms	178/ 1022 (17%)
43.0-44.0 sec	1.17 MBytes	9.84 Mbits/sec	1.890 ms	181/ 1018 (18%)
44.0-45.0 sec	1.17 MBytes	9.84 Mbits/sec	1.798 ms	184/ 1021 (18%)
45.0-46.0 sec	1.22 MBytes	10.2 Mbits/sec	2.378 ms	159/ 1029 (15%)
46.0-47.0 sec	1.22 MBytes	10.2 Mbits/sec	2.443 ms	150/ 1019 (15%)
47.0-48.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.261 ms	148/ 1023 (14%)
48.0-49.0 sec	1.22 MBytes	10.3 Mbits/sec	1.478 ms	144/ 1017 (14%)
49.0-50.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.226 ms	148/ 1023 (14%)
50.0-51.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.285 ms	147/ 1021 (14%)
51.0-52.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.291 ms	145/ 1020 (14%)
52.0-53.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.265 ms	147/ 1021 (14%)
53.0-54.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.243 ms	146/ 1020 (14%)
54.0-55.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.289 ms	146/ 1020 (14%)
55.0-56.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	1.434 ms	143/ 1018 (14%)
56.0-57.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.413 ms	147/ 1022 (14%)
57.0-58.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.349 ms	145/ 1020 (14%)
58.0-59.0 sec	1.22 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.392 ms	148/ 1021 (14%)
59.0-60.0 sec	1.23 MBytes	10.3 Mbits/sec	2.363 ms	145/ 1020 (14%)
Interval	Transfer	Bandwidth	Jitter	Lost/Total Datagrams
0.0-60.1 sec	73.2 MBytes	10.2 Mbits/sec	2.169 ms	8993/61226 (15%)

Рисунок 2.12 – Результат тестирования полосы пропускания при модуляции 16QAM3/4

Из рисунка 2.12 видно что, полоса пропускания нисходящего канала при использовании модуляции 16QAM3/4 составила 10,2 Мбит/с, что позволит предоставить абоненту услугу triple play, а также позволит увеличить скорость передачи данных и подключить дополнительные телефонные номера без потери качества. Данные полученные при тестировании полосы пропускания во время использования остальных видов модуляции приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты измерения полосы пропускания [17]

Максимальная пропускная способность, Мбит/с	BPSK	QPSK	QPSK	16QAM	16QAM	64QAM	64QAM
	1/2	1/2	3/4	1/2	3/4	2/3	3/4
DL – Iskratel	1,5	3,0	4,5	6,0	8,9	12,0	13,5
UL – Iskratel	0,9	1,8	2,7	3,7	5,5	7,4	8,1
DL – Экс.	1,6	3,0	4,7	6,8	10,2	12,4	13,7
UL – Экс.	1,0	2,1	3,0	3,9	5,6	7,4	8,3

По полученным данным построим графики зависимости скорости от используемого типа модуляции. График зависимости для нисходящего канала представлен рисунке 2.13.

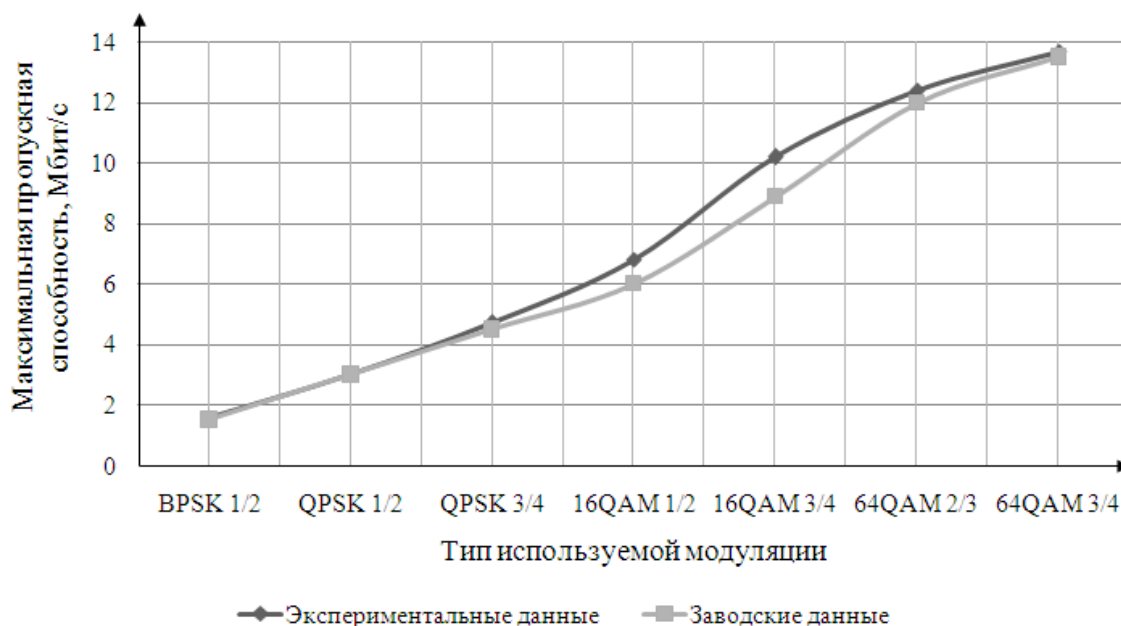


Рисунок 2.13 – Изменение значения максимальной пропускной способности для нисходящего канала

Из рисунка 2.13 видно что, максимальная пропускная способность, для нисходящего канала полученная экспериментальным путем соответствует заводским характеристикам оборудования, за исключением превышения скорости передачи при использовании модуляции 16 QAM. График зависимости для направления вверх представлен на рисунке 2.14.

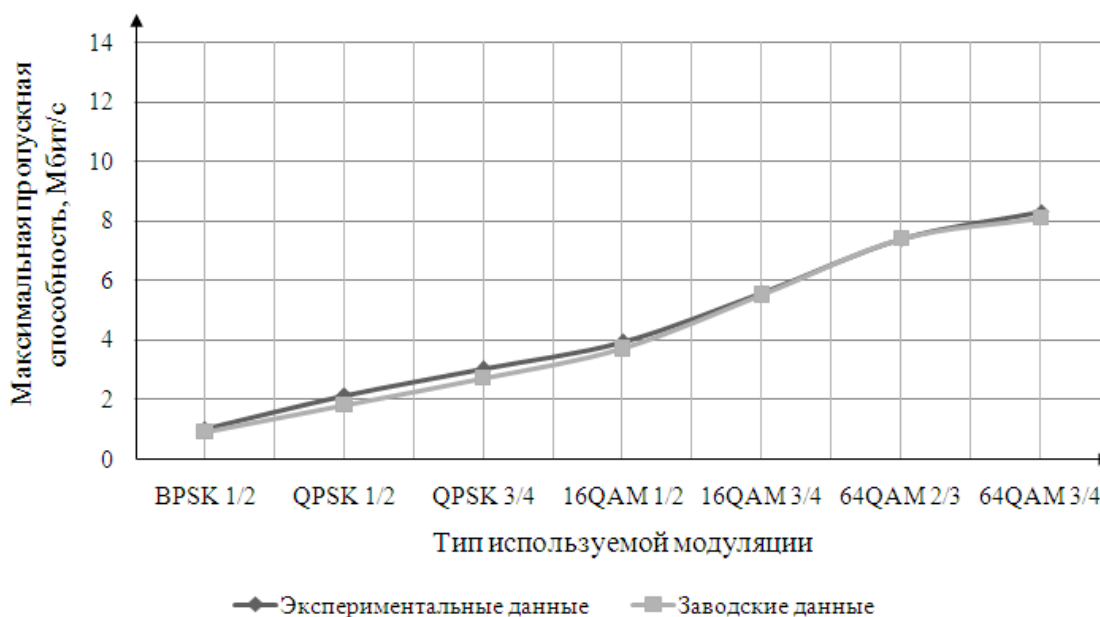


Рисунок 2.14 - Изменение значения максимальной пропускной способности для восходящего канала



Так же как и для нисходящего канала, максимальная полоса пропускания на участке вверх рисунок 2.14, соответствует заводским характеристикам, что позволяет рассчитывать количество абонентов и необходимые скорости передачи для возможного подключения услуги tripleplay.

Таким образом, для гарантирования скорости передачи и качества услуг необходимо использовать наиболее спектрально эффективные виды модуляции QAM. А при увеличении скорости передачи данных и телефонных номеров, учитывать максимально возможную полосу пропускания канала.

### 3 Исследование характеристик радиоканала WiMAX

#### 3.1 Исследование энергетических параметров канала WiMAX

Как и в любой другой технологии, основанной спектра, успешная WiMAX развертывание будет зависеть в значительной степени зависит от наличия и пригодности ресурсов спектра. Для субъектов, оказывающих услуги беспроводной связи, два источника спектра имеются:

- Лицензия спектр и
- Нелицензированные спектра.

Лицензия спектр требует авторизации / лицензии от Комиссии, которая предлагает, что

индивидуальный пользователь - или "Лицензиат" - эксклюзивные права работать на определенной частоте (или частоты) в конкретном месте или в пределах определенной географической области.

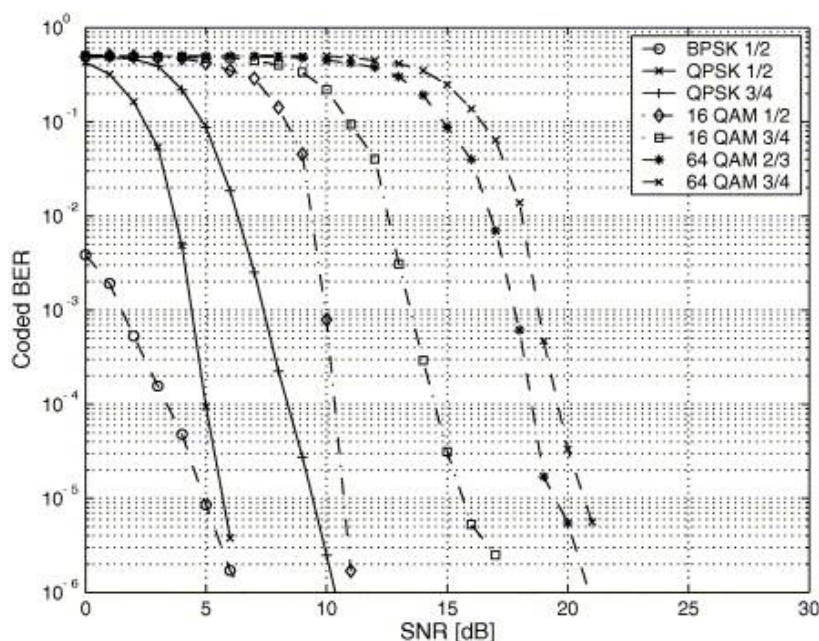


Рисунок 3.1 - Зависимости отношения SNR от битовых ошибок для используемых типов модуляции

В то время как пользователям этого спектра не должны обращаться за индивидуальными лицензиями или заплатить, чтобы использовать спектр, они все еще являются предметом определенных правил. Во-первых, нелицензионные пользователи не должны создавать помехи лицензиатам и должны принимать любые помехи, которые они получают. Во-вторых, любое оборудование, что будет использоваться на нелицензионном спектре должно быть предварительно одобрено Комиссией.

Из-за его рабочий диапазон широк, лицензированные и нелицензированные варианты спектра для технологии WiMAX обширны.

Для того, чтобы максимально эффективно использовать преимущества, предоставляемые системами WiMAX, большой блок спектра назначения наиболее желательным. Это позволяет системам быть развернуты в режиме TDD с большой шириной канала, гибкая частота повторного использования и с минимальными спектральными неэффективностями для сторожевые группы, чтобы облегчить сосуществование с соседними операторами. Еще одним ключевым деятельностью для WiMAX Forum сотрудничает с стандартов и регулирующих органов во всем мире для продвижения распределение спектра в полосах частот ниже (<6 ГГц), который является одновременно и приложения технология нейтральным. Кроме того, есть мощный толчок для большей гармонизации спектра в

Распределение таким образом, чтобы свести к минимуму количество варианты оборудования, необходимого для покрытия по всему миру рынка. Он начальные профили производительности системы, которые будут разработаны в WiMAX Forum для недавно утвердил стандарт интерфейса 802.16-2005 воздуха ожидается в лицензированный 2.3 ГГц, 2,5 ГГц и 3,5 ГГц частот. Группа 2.3 ГГц была распределена в Юго Корея для WiPro услуги, основанные на технологии Mobile WiMAX.

С 27 МГц блока в присвоения спектра на каждого оператора, эта группа будет поддерживать TDD развертывание с 3 каналами на базовой станции и номинальной пропускной способности канала 8,75 МГц. Группа 2.5 до 2,7 ГГц уже доступны для мобильных и фиксированных беспроводных услуг в Соединенные Штаты. Эта группа в настоящее время также недостаточно и, возможно, имеется во многих страны во всем Южной Америки и Европы, а также в некоторых странах Азиатско-Тихоокеанского региона область. Группа 3.5 ГГц уже распределена для фиксированных беспроводных услуг во многих странах по всему миру, а также хорошо подходит для решения WiMAX для фиксированных и мобильных услуг. [26]

$$R_{X_{64QAM3/4}} = N_0 + SNR_{64QAM3/4} + 10 \log(BW_{ef}) + N_f + \text{Implementation Loss} \quad (3.1)$$

где  $SNR_{64QAM3/4}$  требуемый уровень отношения SNR для модуляции  $64QAM^{3/4} = 24,4$  дБ;

$N_0 = 10 \log(kT_0) = -144$  дБ (Вт/МГц) – Receiver Noise Floor спектральная плотность мощности теплового шума приемника,  $kT_0$  – закон равномерного

распределения;

$N_f$  значение собственного шума приемника noise figure равно -8 дБ для IEEE 802.16e, и  $N_f = -7$  дБ по стандарту IEEE 802.16d-2004.

Значение Implementation loss равно 5 дБ. Эта величина отражает так называемые потери реализации, учитывающие не идеальность приемника, ошибки квантования, фазовый шум и др.

$BW_{ef}$  - эффективная ширина спектра группового OFDM сигнала. Эта величина пропорциональна количеству используемых поднесущих в спектре группового сигнала. За счет наличия защитного интервала между поднесущими эффективная ширина спектра OFDM сигнала несколько больше ширины канала  $BW$ . Для канала шириной 10 МГц  $BW_{ef} = 11,52$  МГц,  $10\log(BW_{ef}) = 10,61$  дБ.

В нашем случае при ширине канала равной 7 МГц, необходимо определить эффективную ширину спектра группового OFDM сигнала по формуле [27]

$$BW_{ef} = BWn \quad (3.2)$$

где  $BW$  – ширина канала;

$n$  – коэффициент, принимающий значение 144/125 для каналов, ширина которых кратна 1,25; 57/50 для каналов, ширина которых кратна 2,0; 8/7 для каналов другой ширины.

Рассчитаем эффективную ширину спектра по формуле (3.2)

$$BW_{ef} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 = 8 \text{ МГц}$$

Таким образом, мы получили значение  $BW_{ef} = 8$  МГц,  $10\log(BW_{ef}) = 9,03$  дБ.

Итак, зная все необходимые значения, преобразуем формулу (3.1) для расчета порогового уровня чувствительности выраженного в дБм [5]. Рассчитаем пороговый уровень чувствительности только для на и более спектрально эффективных видов модуляции QAM, способных поддержать установленную скорость для triple play, без ухудшения качества

$$\begin{aligned} R_{X 64QAM3/4} &= -102 + SNR_{64QAM3/4} + 10 \log(BW_{ef}), \\ R_{X 64QAM3/4} &= -102 + 24,4 + 10 \log(8) = -68,57 \text{ дБм}, \\ R_{X 64QAM2/3} &= -102 + 21 + 10 \log(8) = -71,97 \text{ дБм}, \\ R_{X 16QAM3/4} &= -102 + 16 + 10 \log(8) = -76,97 \text{ дБм}, \\ R_{X 16QAM1/2} &= -102 + 13 + 10 \log(8) = -79,97 \text{ дБм} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Тем самым требуемый для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  пороговый уровень чувствительности системы WiMAX фиксированного доступа стандарта IEEE 802.16d-2004 составляет -68,57 дБм и  $SNR_{64QAM3/4} = 24,4$  дБ при implementation loss 5 дБ с шириной канала 7 МГц. Например, для мобильного

WiMAX по стандарту IEEE 802.16с полосой пропускания 10 МГц требуемое отношение  $SNR_{64QAM3/4} = 20$  дБ и, соответственно,  $R_{X 64QAM3/4} = -70,4$  дБм. Отметим, что приведенные выше значения чувствительности справедливы для приемника WiMAX, не использующего технологию разнесенного приема MIMO.

Таким образом, для поддержки некоторой модуляции уровень OFDM сигнала на входе приемника Receive Strength Signal Level в полосе пропускания канала BW должен превышать соответствующий этой модуляции уровень чувствительности, что равносильно тому, что входной сигнал на величину SNR отношения сигнал/шум превышает уровень теплового шума с учетом внутреннего шума приемника и потерь реализации.

Реальные системы WiMAX обычно имеют более высокий по сравнению с требованиями стандарта уровень чувствительности, поскольку значение потерь реализации implementation loss 5 dB и уровень внутренних шумов приемника в стандарте несколько завышено[5]. Так чувствительность выбранной базовой станции Iskratel SI3000 Wimax, фиксированного доступа стандарта IEEE 802.16d в диапазоне частот 3,3 ГГц в канале шириной 7 МГц, с значением собственного шума приемника -5дБ для используемых видов модуляции приведена в таблице 3.1. Также в таблице приведена чувствительность приемника абонентского терминала Star MAX 2160[27].

В принципе, система может поддерживать модуляцию 64QAM  $3/4$  и при значительно более низких значениях сигнала, но при этом уровень битовой ошибки будет хуже значения  $BER=10^{-6}$ .

Таблица 3.1 – Чувствительность приемников БС и АС

Чувствительность приемника при $BER < 10^{-6}$ , дБм	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
БС	-94	-91	-88	-85	-82	-78	-76
АС	-96	-93	-90	-87	-84	-80	-78

Каждая система характеризуется параметром, называемым системным усилением System Gain, определяющим максимальную дальность связи. Системное усиление определяется как

$$\text{System Gain} = T_X - R_X \quad (3.4)$$

где  $T_X$  – выходная мощность передатчика системы;

$R_X$  - чувствительность приемника системы.

Рассчитаем System Gain для наивысшей модуляции 64QAM $3/4$ , в целях сравнения системного усиления выбранной системы с другими системами WiMAXи определения бюджета линии

$$\text{System Gain} = 30+78=108$$

Для расчета дальности связи используют уравнение бюджета канала связи Link Budget. Данное уравнение связывает уровни мощности на входе приемника  $R_{RX}$  и выходной мощности передатчика  $T_X$ , находящихся друг от друга на расстоянии  $D$

$$R_{RX} = T_X + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - L_D \quad (3.5)$$

где  $T_X$  - выходная мощность передатчика, дБм;  
 $G_{TX}$  - коэффициент усиления антенны передатчика, дБи;  
 $G_{RX}$  - коэффициент усиления антенны приемника, дБи;  
 $L_{RX}, L_{TX}$  - СВЧ потери мощности сигнала, соответственно, в приемнике и передатчике, в кабеле, разъемах и др.

$L_D$  - потери в дБ на пути распространения радиоволн на дальность  $D$  км.

Так, в условиях LOS потери мощности сигнала в свободном пространстве рассчитываются как

$$L_D = 20 \log(4\pi D / \lambda) \quad (3.6)$$

где  $\lambda$  длина волны.

Поскольку система поддерживает связь на модуляции 64QAM  $3/4$ , если уровень сигнала на входе приемника  $R_{RX}$  будет выше уровня чувствительности  $R_X$ , то согласно выражению Link Budget (3.5) для этого необходимо, чтобы

$$R_{RX} - FM = T_X + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - L_D - FM \geq R_X, \quad (3.7)$$

$$L_D \leq T_X - R_X + G_{TX} + G_{RX} - L_{RX} - L_{TX} - FM \quad (3.8)$$

где FM - запас по замираниям fade margin.

В реальных системах вследствие замирания сигнала из-за многолучевого распространения радиоволн обычно требуется, чтобы уровень сигнала  $R_{RX}$  превышал уровень чувствительности сигнала на некоторую величину, называемую запасом по замираниям Fade Margin (FM). В системах WiMAX для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  сигнала OFDM достаточно запаса fade margin равное 1 дБ, на практике используют величину fade margin 3 дБ.

Таким образом, для работы на дальности  $D$  км, потери распространения радиоволн должны быть меньше величины:

$$L_D \leq \text{System Gain} + \text{усиление антенн} - \text{СВЧ потери} - \text{Fade Margin} \quad (3.9)$$

Таким образом, чем выше System Gain системное усиление и меньше

требуемый запас по замираниям Fade Margin, тем больший бюджет линка имеет система и соответственно, тем больше дальность связи.

В результате, системы WiMAX имеют бюджет линка Link Budget на 10-20 дБ больше, нежели системы preWiMAX. Как известно, увеличение Link Budget на 6 и 12 дБ увеличивает дальность связи, соответственно, LOS и NLOS в два раза.

В таблице 3.2 представлены сравнительные данные по энергетическим параметрам используемой системы WiMAX, и систем от других производителей, а также preWiMAX при работе на модуляции 64QAM  $\frac{3}{4}$ .

Таблица 3.2 - Энергетические параметры систем WiMAX и preWiMAX

Система	Rx, BS/SS 64QAM $\frac{3}{4}$ , дБм	Tx power BS/SS, дБм	Fade Margin, дБ	SNR, 64QAM $\frac{3}{4}$ , дБ	System gain DL, дБм	Величина запаса DL Link Budget, дБм
WiMAX, Iskratel SI3000	-76/-78	30/24	1	22	108	30
WiMAX, IEEE 802.16-2004,	-70/-70	20/20	1	22	90	18
Airspan MicroMAX	-74/-76	22/20	1	22	98	28
MAXBridge BS 50	-74/71	24/20	1	22	95	24
PreWiMAX	-62/-62	13/13	6	22	75	-

Большинство систем BWA в диапазоне 2.4 ГГц работает на модуляции BPSK, QPSK с одной несущей. Системы 2.4 ГГц стандарта IEEE 802.11g, поддерживающие модуляцию QAM и OFDM с множеством поднесущих, в целях обратной совместимости с системами IEEE 802.11b на модуляциях BPSK, QPSK используют сигнал с одной несущей. Системы с одной несущей для устойчивой работы требуют очень высокого значения величины Fade Margin. Например, для поддержки модуляции BPSK для любых систем теоретически достаточно SNR =3 дБ. Системы WiMAX способны устойчиво работать на данной модуляции при SNR=4 дБ Fade Margin =1 дБ.

Для системы с одной несущей для поддержки модуляции BPSK требуемый уровень SNR для условий LOS составляет 19 дБ fade margin 15 дБ. Фактически более высокие значения fade margin для систем 2,4 ГГц с одной несущей лишают эти системы всех преимуществ использования более низких частот.

Фактически там, где система BWA 2,4 ГГц способна работать на модуляции BPSK, QPSK в канале шириной 20 МГц с реальной скоростью

передачи данных до 3-4 Мбит/с с максимальным радиусом обслуживания базовой станции до 8-10 км, система WiMAX способна работать на максимальной модуляции 64QAM  $3/4$  в канале шириной 7 МГц со скоростью передачи данных в Мбит/с. Более того, система WiMAX способна поддерживать данную скорость на дальности до 25 км.

### 3.2 Исследование влияния интерференции на OFDM канал связи WiMAX

В реальных системах помимо теплового и внутреннего шума приемника присутствует интерференция. Влияние интерференции приводит к деградации уровня чувствительности приемника. Чем выше уровень интерференции, тем на большую величину сигнал на входе приемника RSSL должен превышать уровень чувствительности приемника для поддержки соответствующей модуляции.

Экспериментально установлено, что если уровень интерференции  $I$  (спектральная плотность мощности) находится ниже уровня теплового шума  $N$  на величину в 6 дБ, т.е.  $I/N = -6$  дБ, то эта интерференция не оказывает влияния на приемник системы.

Спектральная плотность теплового шума Power Spectral Density (PSD) приемника составляет [28]

$$N = 10 \log(kT_0) + N_f = -137 \text{ дБ (Вт/МГц)} \quad (3.10)$$

где  $N_f = -7$  дБ

Поэтому уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW=7}}$ , не оказывающей влияния на систему WiMAX, в канале связи шириной  $BW=7$  МГц, равен

$$I_{\text{FLOOR, BW=7}} = -137 + 30 + 10 \log(7) - 6 = -104 \text{ дБм} \quad (3.11)$$

В канале шириной 7 МГц получили уровень интерференции равный  $I_{\text{FLOOR, BW=7}} = -104$  дБм. Обратим внимание, что пороговый уровень интерференции зависит только от ширины канала связи и не зависит от частоты, на которой работает система. При этом пороговый уровень спектральной плотности мощности интерференции  $I_{\text{PSDFLOOR}}$ , измеряемый в дБм /МГц, не зависит и от ширины канала. Уровень интерференции можно также оценивать на входе апертуры антенны величиной плотности потока мощности Power Spectral Flux Density интерференции  $I_{\text{PSFD}}$ , определяемой как

$$I_{\text{PSFD FLOOR}} = I_{\text{PSDFLOOR}} - 10 \log(\lambda^2) - G + 10 \log(4\pi) \quad (3.12)$$

где  $I_{\text{PSDFLOOR}}$  пороговый уровень плотности потока мощности интерференции на входе приемника;

$\lambda = 0,091$  м длина волны на частоте 3,3 ГГц;

$G$  – коэффициент усиления антенны.



Пороговый уровень спектральной плотности потока мощности зависит от частоты, на которой работает система. Обычно данный показатель используют при расчете допустимых норм излучения на рабочих местах и санитарных зон радиотехнических объектов.

Таким образом, система WiMAX способна поддерживать некоторую модуляцию с уровнем ошибок  $BER=10^{-6}$  при уровне мощности сигнала равном чувствительности приемника для данной модуляции и уровне интерференции равном или ниже уровня шума на 6 дБ.

При отсутствии интерференции чувствительность приемника на модуляции 64QAM  $3/4$  равна [5]:

$$R_{x\ 64QAM3/4} = N + SNR_{64QAM3/4} + 10 \log(BW_{ef}) + \text{Implementation Loss} \quad (3.13)$$

При  $I/N = -6$  дБ и  $C = R_{x\ 64QAM3/4}$ , при Implementation Loss равном 0 дБ:

$$\begin{aligned} C/I_{64QAM3/4} &\geq C/N - I/N = R_{x\ 64QAM3/4}/N + 6 = 24,4 + 6 = 30,4 \text{ дБ}, & (3.14) \\ C/I_{64QAM2/3} &\geq 21 + 6 = 27 \text{ дБ}, \\ C/I_{16QAM3/4} &\geq 16 + 6 = 22 \text{ дБ}, \\ C/I_{16QAM1/2} &\geq 13 + 6 = 19 \text{ дБ} \end{aligned}$$

Тем самым, для системы WiMAX с высококачественным приемником в котором значение параметра Implementation Loss близком к нулю, требуемое отношение мощности сигнала к мощности интерференции, называемое также защитным отношением, имеет вид:

$$C/I \geq C/N + 6$$

Для работы системы WiMAX в условиях интерференции на минимальном для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  с  $BER=10^{-6}$  уровне сигнала, необходимо обеспечить  $C/N = SNR_{64QAM3/4} = 24,4$  дБ, то есть  $C/I \geq 30,4$  дБ.

Тем самым, для системы WiMAX с идеальным приемником в котором потери реализации равны нулю при выполнении критерия  $C/I \geq 30,4$  дБ и минимально достаточном для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  уровне входного сигнала  $RSSL = R_{x\ 64QAM3/4}$ , гарантируется, что интерференция находится ниже уровня теплового шума приемника на величину не менее 6 дБ и независимо от типа интерференции практически не оказывает влияния на работу системы.

При превышении пороговой величины  $I/N = -6$  дБ интерференция начинает влиять на работу системы. Степень негативного влияния зависит от типа сигнала интерференции. При оценке чувствительности приемника в качестве шума приемника рассматривается Гауссовский или “белый” шум. Реальный сигнал помехи по своей структуре, естественно, может быть другим и его влияние на работу системы может быть как сильнее, так и слабее

влияния белого шума. Например, узкополосная помеха может оказывать незначительное влияние на широкополосный OFDM сигнал.

Влияние интерференции на систему заключается в снижении уровня чувствительности приемника. Чувствительность системы для модуляции 64QAM  $3/4$  в канале BW= 7 МГц при implementation loss = 0 дБ,  $N_f = -7$  дБ согласно выражению (3.1) равна:

$$R_{X \text{ 64QAM}3/4} = -107 + 24,4 + 10 \log(8) = -73,57 \text{ дБм}$$

$$R_{X \text{ 64QAM}2/3} = -107 + 21 + 10 \log(8) = -76,97 \text{ дБм}$$

$$R_{X \text{ 16QAM}3/4} = -107 + 16 + 10 \log(8) = -81,97 \text{ дБм}$$

$$R_{X \text{ 16QAM}1/2} = -107 + 13 + 10 \log(8) = -84,97 \text{ дБм}$$

При  $I/N = -6$  дБ деградация чувствительности приемника, представляющая собой разницу между  $C/N$  и  $C/(N+I)$ , не превышает 1 дБ. То есть, при  $I/N = -6$  дБ справедливо  $C/(N+I) = 1 + C/N$  [29].

На рисунке 3.2 приведена зависимость между отношением  $C/I$  сигнал/интерференция и мощностью сигнала  $C$ , требуемой для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  в канале шириной 7 МГц.

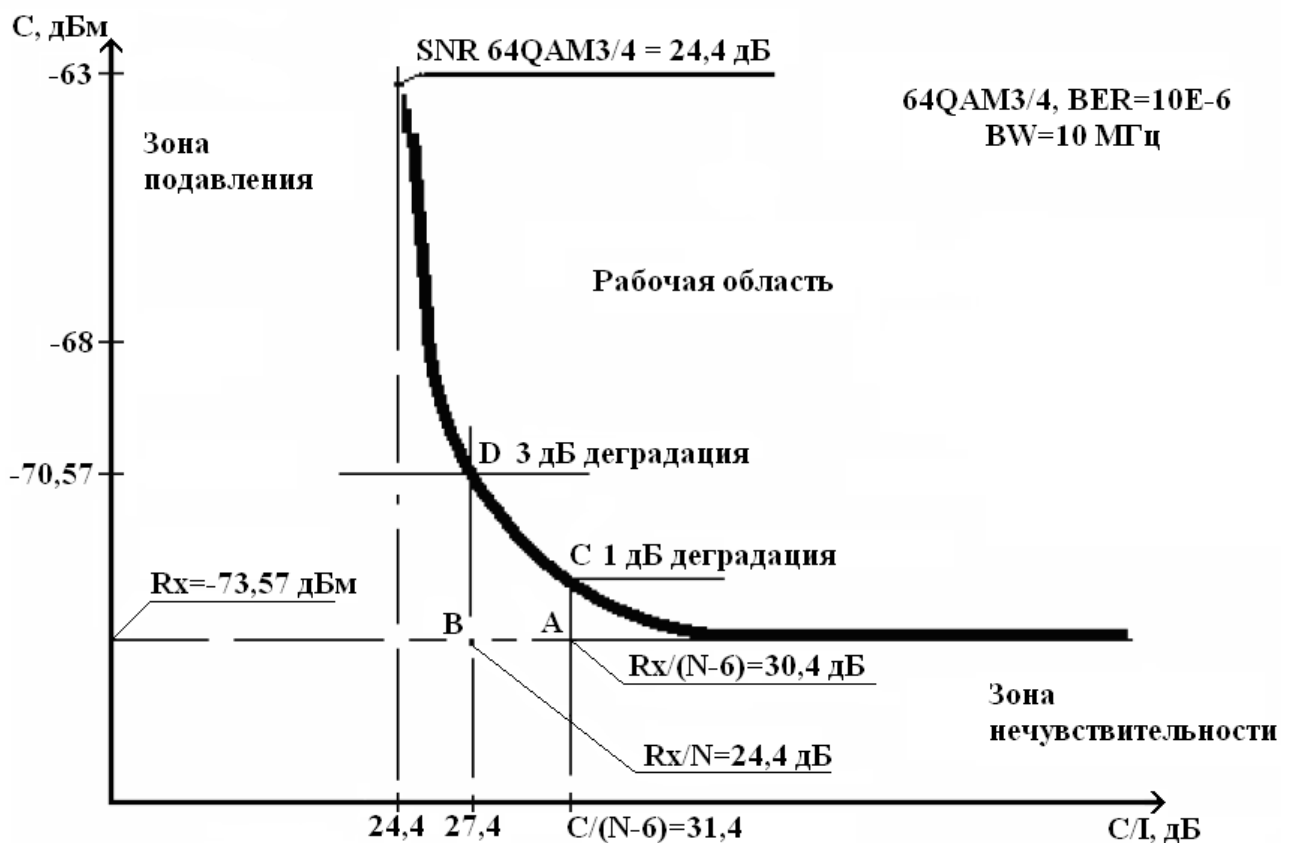


Рисунок 3.2 - Зависимость между  $C/I$  и требуемой мощностью сигнала  $C$

Если интерференция равна или превышает уровень  $I/N = -6$  дБ точка А, то для работы системы на некоторой модуляции необходимо, чтобы мощность

полезного сигнала превышала деградировавший вследствие воздействия интерференции уровень чувствительности приемника системы для этой модуляции точка С на рисунке 3.2. Соотношение между значением спектральной плотности мощности интерференции  $I$  и величиной деградации  $\Delta$  уровня чувствительности имеет вид:

$$I = 10 \log (10^{\Delta/10} - 1) + N \quad (3.15)$$

При мощности интерференции  $I$  равной уровню шума приемника  $N$  и при допущении, что интерференция представляет собой белый шум или, как минимум, интерференция происходит от однотипной системы, деградация чувствительности равна 3 дБ, т.е.  $C/(N+I) = 3 + C/N$ , точка D. При мощности интерференции на 10 дБ выше уровня теплового шума приемника  $I/N=10$  дБ деградация чувствительности равна 9.5 дБ, т.е.  $C/(N+I) = 9.5 + C/N$ .

Таким образом, при  $I=N$  необходимо, чтобы  $C/I \geq C/N + 3$  дБ, при implementation loss = 0. При мощности интерференции выше уровня шума на 10 дБ, т.е.  $I/N=10$  дБ, необходимо, чтобы выполнялось отношение  $C/I \geq C/N - 9.5 + 10 = C/N + 0.5$  дБ.

В пределе, при высоком уровне интерференции  $I/N > 10$  дБ и implementation loss близком к нулю, для работы системы на некотором типе модуляции, требующем соответствующий уровень  $C/N$ , необходимо

$$C/I \geq C/N \quad (3.16)$$

Таким образом, для работы системы WiMAX в условиях высокой интерференции для поддержки модуляции 64QAM  $3/4$  с BER= $10^{-6}$  необходимо обеспечить уровень мощности сигнала, при котором выполняется

$$C/I \geq C/N = \text{SNR}_{64\text{QAM}3/4} = 24,4 \text{ дБ}$$

На рисунке 3.2 можно выделить три области: зону нечувствительности, зону подавления и рабочую область.

Зона нечувствительности охватывает область, где уровень мощности сигнала находится ниже порога чувствительности, и поэтому система не может поддерживать соответствующий тип модуляции с уровнем ошибок BER= $10^{-6}$ .

Зона подавления охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и левее кривой зависимости  $C$  от  $C/I$ , где интерференция подавляет работу системы на соответствующей модуляции вследствие недостаточно высокой мощности сигнала  $C$ .

Рабочая область охватывает уровень мощности сигнала выше порога чувствительности и правее кривой зависимости  $C$  от  $C/I$ , где выполняется требуемое отношение  $C/I$ , и система может работать на соответствующей

модуляции в условиях интерференции благодаря достаточно высокой мощности сигнала  $C$ .

WiMAX является системой с автоматической регулировкой мощности АTRC. На базовых станциях задается максимально возможный уровень входного сигнала RSSL. Для систем WiMAX данный уровень обычно устанавливается, превышающем чувствительность приемника для 64QAM  $3/4$  примерно на 5-10 дБ.

Таким образом, для работы системы WiMAX на модуляции 64QAM  $3/4$  с  $BER=10^{-6}$  в условиях интерференции на максимальном уровне сигнала на входе приемника, превышающем уровень чувствительности на 10 дБ и более, необходимо обеспечить  $C/I \geq 24,4$  дБ.

Выполнение критерия  $C/I \geq 30,4$  дБ необходимо для системы с идеальным приемником при минимально возможном, находящимся на границе чувствительности для 64QAM  $3/4$  и  $BW=7$  МГц уровне мощности сигнала  $C = R_x = -73,57$  дБм. При этом максимально допустимая мощность интерференции  $I_{MAX}$  должна быть на 6 дБ ниже уровня теплового шума  $N$ , то есть пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR}$ , на котором деградация чувствительности идеального приемника не превышает 1 дБ, равен  $I_{FLOOR}/N = -6$  дБ.

Для того, чтобы интерференция не оказывала влияния на систему с потерями реализации равными значению implementation loss, т.е. чувствительность этой системы была деградирована дополнительно не более чем на 1 дБ, необходимо, чтобы значение отношения сигнал/ шум+ интерференция превышало значение требуемого для поддержки той или иной модуляции отношения сигнал/ шум на величину суммарного понижения чувствительности вследствие потерь реализации и вследствие интерференции  $\Delta = \text{implementation loss} + 1$  дБ

$$C/(N+I) = \text{implementation loss} + 1 + C/N = \Delta + C/N \quad (3.17)$$

Мощность интерференции  $I_{MAX, BW}$  в канале шириной  $BW$ , приводящей к суммарному понижению чувствительности на величину  $\Delta$ , согласно выражению (3.15) рассчитывается как [30]

$$I_{MAX, BW} = \log(10^{\Delta/10} - 1) + N_{BW} \quad (3.18)$$

где  $I_{MAX, BW}$  - максимально допустимая мощность интерференции в канале шириной  $BW$ ;

$N_{BW}$  - мощность теплового шума приемника системы в полосе.

При, например, implementation loss = 2 дБ уровень чувствительности уже понижен на 2 дБ, и интерференция с уровнем  $I=N$  приводит к дополнительной деградации чувствительности на 1 дБ, и следовательно, не оказывает влияния на приемник системы.

Для систем с implementation loss равном 3 дБ уровень максимально допустимой мощности интерференции равен  $I_{MAX} = 1.8 + N = 2 + N$ .

При максимальном значении implementation loss равном 5 дБ выражение (3.17) имеет вид

$$C/(N+I) = 6 + C/N \quad (3.19)$$

Для выполнения равенства (3.19) мощность интерференции рассчитывается как

$$I_{MAX} = 10 \log (10^{6/10} - 1) + N = 4,7 + N = 5 + N$$

Деградация чувствительности системы с потерями реализации 5 дБ не превышает 1 дБ при мощности интерференции равной  $4,7 + N$ , что, для работы системы на модуляции 64QAM  $3/4$  в канале  $BW = 7$  МГц требует отношения сигнал/интерференция  $C/I = C/(4,7 + C/N) = 25,7$  дБ.

Таким образом, интерференция, не превышающая более чем на 5 дБ уровень теплового шума системы WiMAX с максимально допустимым уровнем потерь реализации в 5 дБ, приводит к деградации этой системы не более чем на 1 дБ и поэтому практически не влияет на систему.

Учитывая, что мощность сигнала на входе приемника реальной системы для поддержки той или иной модуляции должна превышать уровень чувствительности на 3 дБ, то для практического применения можно принять, что на приемник системы с потерями реализации равными implementation loss не оказывает влияния интерференция с мощностью меньше или равная пороговому уровню  $N + \text{implementation loss}$ . Погрешность такой аппроксимации примерно равна 1 дБ.

Таким образом, вычислив потери реализации как разницу между максимально возможным уровнем чувствительности при noise figure равном минус 7 дБ системы на модуляции M в канале шириной BW и реальной чувствительностью системы для этих же условий, можно рассчитать пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR, BW}$  в полосе канала шириной BW, как максимально возможный уровень интерференции, не приводящий к деградации чувствительности более 1 дБ.

Например, пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR, BW}$  в виде “белого шума  $I = N + 5$  дБ, не оказывает влияния на систему WiMAX с потерями реализации 5 дБ, в канале связи шириной 7 МГц, т.е

$$I_{FLOOR, BW=7} = -107 + 10 \log (7) + 5 = -93 \text{ дБм}$$

Собственные шумы noise figure приемника реальных систем могут быть ниже величины минус 7 дБ и достигать значения минус 5 и даже минус 4 дБ. При низком уровне собственных шумов noise figure приемник системы имеет также более низкое значение теплового шума N и, соответственно, более низкий пороговый уровень интерференции  $I_{FLOOR}$ .

Пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}} = N + \text{implementation loss} + 10 \log(\text{BW})$  как максимально допустимый уровень мощности интерференции  $I_{\text{MAX, BW}}$ , не приводящий к деградации чувствительности больше 1 дБ в полосе шириной  $\text{BW}$  для модуляции  $M$ , приблизительно можно вычислить из выражения (3.11) следующим образом:

$$I_{\text{FLOOR, BW}} = N_{\text{BW}} + \text{impl. loss} = R_{xM, \text{BW}} - \text{SNR}_M \quad (3.20)$$

где  $R_{xM, \text{BW}}$  - чувствительность системы для модуляции  $M$  в канале шириной  $\text{BW}$ ;

$N_{\text{BW}}$  - мощность теплового шума приемника в полосе  $\text{BW}$ .

Тем самым, при расчете максимально допустимого уровня интерференции, не приводящей к деградации чувствительности приемника системы больше чем 1 дБ, величины потерь реализации и noise figure не используются и могут быть неизвестны.

Таким образом, для определения порогового уровня мощности интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}}$  не влияющей на систему WiMAX в полосе ширины канала  $\text{BW}$ , следует просто найти разницу между уровнем чувствительности для нужной ширины канала, для 64 QAM  $3/4$ ,  $\text{BW}=7$  МГц и требуемым для модуляции 64 QAM  $3/4$  значением  $\text{SNR}_{64 \text{ QAM } 3/4}$  равно 24,4 дБ. Для  $\text{BW}=7$  МГц и  $R_{x 64 \text{ QAM } 3/4} = -68,57$  дБм пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}=7}$ , равный максимальной мощности интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}=7}$  в канале шириной  $\text{BW}=7$  МГц, приводящей к деградации реальной чувствительности системы на 1 дБ, равен:

$$I_{\text{FLOOR, BW}=7, 64 \text{ QAM } 3/4} = R_{x 64 \text{ QAM } 3/4} - \text{SNR}_{64 \text{ QAM } 3/4} = -68,57 - 24,4 = -92,87 \text{ дБм}$$

Тем самым, мы имеем очень простое правило определения порогового уровня интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для системы с потерями реализации, заключающееся в получении разности значения чувствительности системы  $R_{xM}$  для некоторой модуляции  $M$  и требуемого для поддержки этой же модуляции значения сигнал/шум  $\text{SNR}_M$  [29]

$$I_{\text{FLOOR}} = R_{xM} - \text{SNR}_M$$

Таким образом, пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}}$  для модуляции  $M$  в канале шириной  $\text{BW}$ , на котором деградация чувствительности не превышает 1 дБ, для систем с потерями реализации 5 дБ по стандарту IEEE 802.16 составляет величину  $I_{\text{FLOOR}} = R_{xM} - \text{SNR}_M$

Пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR, BW}}$  для модуляции  $M$  в канале шириной  $\text{BW}$ , на котором деградация чувствительности не превышает 1 дБ, для систем с потерями реализации близкими к нулю составляет величину  $N_{\text{BW}} - 6$ .

Для системы с потерями реализации близкими к нулю и величиной noise figure -7 дБ пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для модуляции 64QAM  $3/4$  и канала шириной  $BW=7$  МГц составляет[31]

$$I_{\text{FLOOR}}=N_{\text{BW}}-6 = -97,87 -6= -103,87\text{дБм}$$

Для идеальной системы WiMAX с потерями реализации близкими к нулю и величиной noise figure -4 дБ пороговый уровень интерференции  $I_{\text{FLOOR}}$  для модуляции 64QAM  $3/4$  и канала шириной  $BW=7$  МГц составляет

$$I_{\text{FLOOR}}=N_{\text{BW}}-6= N + 10\log(7)-6= -107,87\text{дБм};$$

где,  $N= 10 \log (kT_0)+N_f = -140$  дБВт - спектральная плотность мощности теплового шума приемника при  $N_f= -4$  дБ;

$kT_0$ - закон равномерного распределения.

Таким образом, максимально допустимый уровень интерференции, не оказывающий влияния на систему WiMAX, весьма существенно зависит от качественных параметров ее приемника. Чем более качественная система, тем больше она подвержена интерференции и, в то же время, тем больше она имеет возможностей для предотвращения ее негативного влияния.

### 3.3 Определение скорости передачи данных на сектор

Для определения максимально возможного числа абонентов, на один сектор и соответственно установления порогового значения скорости передачи данных для этих абонентов необходимо рассчитать скорость передач данных на один сектор. Скорость передачи данных зависит от ширины полосы канала и используемой схемы модуляции [32]. На скорость передачи данных влияют защитный интервал символа  $T_g$ , отношении распределения ресурсов вниз/вверх (DL/UL) и время передачи протокольной информации  $T_h$ . Момент времени, в течение которого никакие данные не передаются, а посылается различная системная информация, необходимая для инициализации и синхронизации, называется временем передачи протокольной информации. Тогда по формуле (3.21), можно рассчитать скорость передачи данных по направлению вниз[33]

$$R_{\text{DL}} = BWn (N_{\text{данDL}}/N_{\text{всего}})vR_{\text{сим}} [1- (1/T_h + T_g)] K_{\text{TDD DL}} \quad (3.21)$$

где  $BW$  – ширина канала;

$n$ - коэффициент дискретизации;

$N_{\text{данDL}}$  – число поднесущих для передачи данных по направлению вниз;

$v$  – скорость сверточного кодирования;

$R_{\text{сим}}$  – количество бит на символ;

$T_h$ – время передачи протокольной информации;

$T_g$ – защитный интервал;



$K_{TDD DL}$  – коэффициент распределения ресурсов по направлению вниз.  
Для расчета скорости передачи данных по направлению вверх

$$R_{UL} = BWn (N_{данUL}/N_{всего})vR_{сим} [1 - (1/T_h + T_g)] K_{TDD UL} \quad (3.22)$$

где  $N_{данUL}$  – число поднесущих для передачи данных по направлению вверх;

$K_{TDD UL}$  – коэффициент распределения ресурсов UL.

При расчетах  $T_h$  принимается равным 20% от основного времени передачи, а значение защитного интервала – 1/16 от длительности полезного символа. Соотношение между направлениями вниз/вверх позволяет регулировать отношение скоростей, в нашем случае оно соответственно составляет 60/40. Стандарт IEEE 802.16 ориентирован на использование полос частот шириной в 1,25; 5,0; 7,0; 10,0; 20,0 МГц и основан на технологии OFDM. За счет наличия защитного интервала между поднесущими эффективная ширина спектра сигнала несколько больше ширины канала  $BW$ , поэтому используемую полосу частот можно рассчитать как произведение ширины канала  $BW$ , числа используемых поднесущих  $N_{исп}$ , полного числа поднесущих OFDM сигнала  $N_{всего}$  и коэффициента дискретизации  $n$ . Следует заметить, что  $N_{исп}$  состоит из суммы числа поднесущих данных  $N_{дан}$  и числа пилотных поднесущих  $N_{пилот}$  формула (3.23). Число поднесущих данных определяется для нисходящего направления  $N_{данDL}$  и восходящего направления  $N_{данUL}$ . Коэффициент дискретизации  $n$  определяет интервал между поднесущими (вместе с шириной полосы и количеством поднесущих данных), и полезное время символа, для полосы частот 7МГц он равен 8/7[33].

$$N_{исп} = N_{дан} + N_{пилот} \quad (3.23)$$

Таким образом, для выбранного оборудования и диапазона частот получаем следующие данные  $N_{всего} = 256$ ,  $N_{дан} = 192$ ,  $N_{пилот} = 8$ ,  $N_{пуст} = 56$ . Тогда по формуле (3.23) найдем число используемых поднесущих  $N_{исп}$

$$N_{исп} = 192 + 8 = 200$$

Количество поднесущих для нисходящего и восходящего канала определяется соответственно из отношения TDD. Таким образом, для выбранного отношения получаем следующие данные  $N_{данDL} = 120$ ,  $N_{данUL} = 80$ .

Количество бит на символ определяется типом используемой модуляции и скоростью сверточного кодирования. Данные для используемых видов модуляции приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры схем модуляции [18]

Тип модуляции	Скорость сверточного кодирования	Количество бит в одном подканале $R_{сим}$
---------------	----------------------------------	--

BPSK	1/2	1
QPSK	1/2	2
QPSK	3/4	2
16-QAM	1/2	4
16-QAM	3/4	4
64-QAM	2/3	6
64-QAM	3/4	6

По формулам (3.21) и (3.22) рассчитаем скорость передачи данных по направлению вниз и вверх для используемых типов модуляции

$$R_{DL64QAM\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 3/4 \cdot 6 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 22,46 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{UL64QAM\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 3/4 \cdot 6 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 9,98 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DL64QAM\ 2/3} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 2/3 \cdot 6 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 19,97 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{UL64QAM\ 2/3} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 2/3 \cdot 6 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 8,88 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DL16QAM\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 3/4 \cdot 4 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 14,98 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{UL16QAM\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 3/4 \cdot 4 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 6,65 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DL16QAM\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 1/2 \cdot 4 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 10,03 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{UL16QAM\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 1/2 \cdot 4 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 4,41 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DLQPSK\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 3/4 \cdot 2 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 7,49 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{ULQPSK\ 3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 3/4 \cdot 2 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 3,37 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DLQPSK\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 1/2 \cdot 2 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 4,99 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{ULQPSK\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 1/2 \cdot 2 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 2,21 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{DLBPSK\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (120/256) \cdot 1/2 \cdot 1 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1,5 = 2,48 \text{ Мбит/с,}$$

$$R_{ULBPSK\ 1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 \cdot (80/256) \cdot 1/2 \cdot 1 [1 - (1/20 + 1/16)] \cdot 1 = 1,12 \text{ Мбит/с}$$

Полученные скорости передачи данных на сектор для DL и UL каналов занесем в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Скорость передачи данных на сектор

Скорость передачи, Мбит/с	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
DL	2,48	4,99	7,49	10,03	14,98	19,97	22,46
UL	1,12	2,21	3,37	4,41	6,65	8,88	9,98

Анализируя скорости передачи данных, полученные при расчетах и сравнивая с указанными в таблице 2.2, скоростями, озвученными WiMAX Forum, можно заметить что скорости, посчитанные по формулам (3.21) и (3.22) несколько превышают стандартные. Это связано с тем, что в расчетах учтен циклический префикс OFDM и нестандартно установленное значение отношения DL:UL.

#### 4 Разработка рекомендаций для улучшения качества передачи услуги triple play по сети WiMAX

Основными задачами при реализации сетей WiMAX для предоставления услуг triple play, как уже было сказано, является гарантирование качества предоставляемых услуг, возможность передачи широкополосного сигнала большому количеству абонентов, а так же обеспечение необходимой емкости сети из расчетов максимальной скорости передачи базовой станции, необходимой полосы пропускания для мультимедийных услуг и общего числа абонентов. Каждый из многочисленных производителей оборудования в рамках используемого стандарта пытается решить данные задачи, но в итоге главные модификации и изменения необходимо производить именно оператору связи, предоставляющему услуги по сетям беспроводного широкополосного доступа.

Основная задача, решаемая оператором сети WiMAX в ходе обеспечения качества услуг, является задача обеспечения эффективного управления радиоресурсами сети. Емкость сети должна быть распределена в соответствующих пропорциях между абонентами и услугами в нужное время в нужном месте за счет использования эффективных алгоритмов планирования трафика, обеспечивающих баланс между требуемым QoS для каждого вида услуг и пользователя, в соответствии с доступными ресурсами и потребностями абонентов.

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) [6,7] представляет собой метод мультиплексирования что подразделяет полосы пропускания на несколько поднесущих, как показано на рисунке 2.

В системе OFDM, входной поток данных разделен на несколько параллельных подпотоков в скорость снижается данных (таким образом, увеличилась длительность символа), и каждый суб-поток модулируется и передается на отдельной ортогональной поднесущей. Повышенная длительность символа улучшает Надежность OFDM, чтобы задержать распространение. Кроме того, введение циклического Префикс (CP) может полностью устранить межсимвольной помехи (ISI), пока КП

Продолжительность больше, чем разброс задержки канала. CP, как правило, повторение последних образцов части данных блока, который будет добавляться к началу данных полезная нагрузка, как показано на рисунке 3.

CP предотвращает межблочных помехи и делает канал появится круговая и позволяет низкой сложности компенсацию в частотной области. воспринимается недостатком является то, что CP он вводит накладных расходов, который эффективно снижает эффективное использование пропускной способности. В то время как CP действительно уменьшает эффективности полосы пропускания несколько, то влияние КП похоже на "коэффициент скругления" в фальш-косинус фильтрованной одной несущей

системы. С OFDM имеет очень резкий, почти "кирпич-стены" спектр, большую долю выделенная полоса пропускания канала может использоваться для передачи данных, что позволяет умеренной потери в эффективности из-за циклического префикса.

OFDM использует частотное разнесение многолучевого канала путем кодирования и перемежения информации между поднесущими до передачи. OFDM модуляция может быть реализована с эффективным обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT), который дает большое количество поднесущих (до 2048) с низкой сложностью. В OFDM системе, ресурсы доступны во временной области с помощью OFDM символов и в частотной области посредством поднесущих. Временные и частотные ресурсы могут быть организованы в суб-каналы для распределения отдельных пользователей.

Ортогональным частотным разделением множественного доступа (OFDMA) -является множественным доступом / схема мультиплексирования, что обеспечивает мультиплексирование работу потоков данных от нескольких пользователей на нисходящей подканалы и восходящей линии связи множественного доступа с помощью восходящей линии подканалов[34].

И как было отмечено выше, необходимо назначать соответствующие классы приоритетизации трафика соответствующей услуге в целях, сохранения полосы пропускания и стабилизации показателей качества канала таких как задержка, джиттер и потеря данных.

Существенное место при подключении новых абонентов следует уделять энергетическим параметрам системы, и проверять характеристики радиоканала при каждой установке нового абонентского оборудования. Поскольку именно энергетические характеристики радиоканала определяют отношение сигнал шум, а как вследствие и используемый тип модуляции, так как в выбранном стандарте используется адаптивная модуляция. Которая заключается в применении методов модуляции и кодирования, рассчитанных на передачу данных как можно на более высокой скорости, когда канал в хорошем состоянии, и передавать на более низкой скорости, когда канал имеет плохие характеристики, чтобы избежать чрезмерного числа ошибочных пакетов.

Но при предоставлении широкополосных мультимедийных услуг, приемлемы далеко не все типы модуляции, используемые в стандарте, поскольку они не способны поддержать установленную скорость без ухудшения качественных показателей [35]. Поэтому при установке нового оборудования необходимо обращать внимание на то, что необходимо использовать только спектрально эффективные виды модуляции QAM, способные поддержать заданную скорость.

А для предотвращения периодического изменения модуляции в результате, действия помех, интерференции или рефракции необходимо изменить запас на замирания fade margin. Так как используемы вид модуляции так же определяет возможную скорость передачи и доступную полосу

пропускания, и в случае переключения модуляции на менее спектрально эффективную гарантии качества для абонентов могут измениться. Поэтому для создания дополнительной емкости сети необходимо изменить значение TDDв сторону нисходящего канала, так как требования к скорости DLзначительно выше, чем к скорости UL.

## **Заключение**

Появление технологии WiMAX было вызвано естественным развитием потребностей в услугах широкополосного доступа к сетям передачи данных. Поскольку использование беспроводной технологии – наиболее быстрый путь построения систем и сетей предоставляющих такие услуги. Вследствие того что WiMAX –позволяет предоставлять услуги triple play для абонентов, чьи дома расположены в районах города, где нет свободных линий связи, а стоимость прокладки новых слишком высока, развитие сетей WiMAX в мегаполисах является актуальной альтернативой существующим широкополосным технологиям, таким как xDSL, Wi-Fi и xG.То есть актуальность развития сетей беспроводного широкополосного доступа для предоставления мультимедийных услуг крайне высока.

Как и в большинстве случаев развития новых сетей, а особенно передачи высококачественных услуг по этим сетям требуют соответствующих исследований, даже если технология хорошо зарекомендовала себя при решении передачи данных. Поскольку предоставление мультимедийных услуг требует, более высокой полосы пропускания и гарантирования качественных показателей канала.

Одной из отличительных особенностей стандарта IEEE 802.16 является использование технологий для поддержки широкополосных услуг, это адаптивная модуляция, приоритезация трафика, множественный доступ с разделением по времени. Применение адаптивной модуляции позволяет системе WiMAX приспособивать схему модуляции сигнала в зависимости от уровня отношения сигнал-шум в радиоканале, но как показали исследования не все виды модуляции, используемые в стандарте способны поддержать заданную скорость передачи необходимую для услуги triple play. Испытания показали, что при использовании модуляции 64QAM 3/4 полученный уровень задержки 18,939 мс меньше чем при модуляции 16QAM 3/4, и значительно меньше, чем при QPSK 3/4.

При этом полученное значение задержки при использовании модуляции QPSK превышает максимально допустимый уровень задержки для передачи видео трафика в 50 мс. Поэтому для предоставления высококачественных услуг необходимо использовать наиболее спектрально эффективные типы модуляций QAM, а при подключении нового оборудования необходимо

учитывать, что энергетические параметры канала могут изменяться с течением времени, воздействуя на работу всей системы. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо изменить запас на замирания *fade margin* для переключения модуляций, тем самым стабилизировав работу системы.

Использование приоритетов QoS в сетях WiMAX позволяет предоставлять услуги, для которых крайне важно значение качественного канала передачи. И полученные результаты в ходе проведения эксперимента с назначением различных приоритетов показали что, в независимости от полосы пропускания, необходимо назначать различным услугам приоритеты, предназначенные только для передачи этих услуг. При использовании только приоритета UGS предназначенного для VoIP по сравнению с использованием приоритетов 1 Мб/с BE+6 Мб/с RtPS+ +64 Кб/с UGS, среднее значение задержки уменьшилось на 1,915 мс, хотя в среднем на 1,5 мс выросли уровни максимальной задержки и джиттера, но все же все параметры находятся на допустимом уровне для всех видов трафика в услуги *triple play*. Так же можно заметить, что более чем в два раза выросло значение потери пакетов с 0,08 до 0,166, это связано с тем, что для передачи данных использовался другой протокол транспортного уровня за место TCP, был использован UDP.

И хоть значение потери пакетов также меньше максимально допустимого уровня для передачи данных и интернета, тем не менее, для этой услуги необходимо использовать соответствующий вид приоритета трафика *Best Effort*. И таким образом мы получили ухудшения и параметра максимальной задержки настолько важного для передачи качественной телефонии и телевидения, и параметра потери пакетов необходимого для гарантированной передачи данных.

Не маловажным фактором при подключении абонентов является определение максимально возможной скорости передачи. При желании абонента увеличить скорость подключения к сети интернет или увеличения числа телефонных линий, необходимо знать сможет ли существующий канала передачи подержать дополнительную нагрузку. При тестировании канала применялась программа *Iperf*, которая представляет собой генератор TCP и UDP трафика для тестирования пропускной способности сети. Полученные данные были сопоставлены, с заводскими характеристиками для проверки точности измерения. Измерения проводились отдельно для нисходящего и восходящего канала.

Максимальная пропускная способность, для нисходящего канала полученная экспериментальным путем соответствует заводским характеристикам оборудования, за исключением превышения скорости передачи при использовании модуляции 16 QAM в среднем на 1 Мбит/с. Так же как и для нисходящего канала, максимальная полоса пропускания на участке вверх, соответствует заводским характеристикам, что позволяет рассчитывать количество абонентов и необходимые скорости передачи для возможного подключения услуги *triple play*. Таким образом, для гарантирования скорости передачи и качества услуг необходимо при

увеличении скорости передачи данных и телефонных номеров, учитывать максимально возможную полосу пропускания канала.

Для поддержки необходимой модуляции, энергетические параметры канала должны соответствовать этой модуляции, поэтому в работе были рассчитаны необходимая чувствительность приемника при отсутствии интерференции, а так же уровни интерференции, в заданной полосе пропускания влияющие на радиоканал. По результатам расчетов было выяснено что, максимально допустимый уровень интерференции, не оказывающий влияния на систему WiMAX, весьма существенно зависит от качественных параметров ее приемника. Чем более качественная система, тем больше она подвержена интерференции и, в то же время, тем больше она имеет возможностей для предотвращения ее негативного влияния.

Максимально возможное количество абонентов зависит от общей скорости передачи данных на сектор, поэтому расчет этой величина является крайне важным. На скорость передачи данных влияют количество используемых поднесущих OFDM, полоса пропускания, используемый тип модуляции, циклический префикс и коэффициент распределения ресурсов по направлению вниз и вверх. В целях создания дополнительной пропускной способности БС, было изменено значение TDD в сторону нисходящего канала в отношении 60:40, так как требования к скорости DL выше, чем для канала UL.

А также установлено значение защитного интервала –  $1/16$  от длительности полезного символа. Анализируя скорости передачи данных, полученные при расчетах и сравнивая с скоростями, озвученными WiMAX Forum, можно заметить что скорости, посчитанные по формулам несколько превышают стандартные. Это связано с тем, что в расчетах учтен циклический префикс OFDM и нестандартно установленное значение отношения DL:UL. Так, к примеру, скорость канала на модуляции 64QAM3/4 полученная аналитическим путем составляет 22,46Мбит/с и 9,98Мбит/с для нисходящего и восходящего канала соответственно, а максимально возможная указанная в WiMAX Forum 26,2Мбит/с.

В диссертации были рассмотрены основные проблемы, связанные с построением сети WiMAX в мегаполисе для предоставления услуг triple play, были проведены соответствующие исследования и аналитические расчеты, доказывающие возможность построения такой сети, а также даны технические рекомендации способные улучшить работу и качественные показатели канала.

## Перечень сокращений

<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard (Улучшенный стандарт шифрования);
<b>AFR</b>	Association Failure Ratio (Относительное число неудачных соединений);
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode (Асинхронный способ передачи данных);
<b>B2B</b>	Business to Business (Бизнес для бизнеса);
<b>BE</b>	The best-effort service (Класс услуг передачи данных без гарантий требуемого качества);
<b>BER</b>	Bit error rate (Частота ошибочных битов);
<b>BPSK</b>	Binary phase-shift keying (Двоичная фазовая манипуляция);
<b>BWA</b>	Broadband wireless access (Беспроводной широкополосный доступ);
<b>CINR</b>	Carrier to Interference + Noise Ratio (Отношение уровня сигнала к уровню шума);
<b>CIR</b>	Committed Information Rate (Гарантированная полоса пропускания);
<b>DES</b>	Data Encryption Standard (Симметричный алгоритм шифрования);
<b>DL</b>	Down Link (Нисходящий канал);
<b>DSL</b>	Digital subscriber line (Цифровая абонентская линия);
<b>EPG</b>	Electronic Program Guide (Электронная телепрограмма);
<b>ertPS</b>	The extended real-time polling service (Класс услуг передачи данных в реальном времени с опросом на передачу);
<b>GPS</b>	Global Positioning System (Система глобального позиционирования);
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров по электротехнике и электронике);
<b>LOS</b>	Line of Sight (Прямая видимость);
<b>MAN</b>	Metropolitan area network (Городская вычислительная сеть);
<b>MPEG</b>	Moving Picture Experts Group (Экспертная группа по движущемуся изображению);
<b>MSS</b>	Mobile Subscriber Station (Мобильная абонентская станция);
<b>NLOS</b>	Near line of sight (почти прямая видимость);
<b>nPVR</b>	Network Personal Video Recorder (Сетевой персональный видеомаягнитофон);
<b>nrtPS</b>	The non-real-time polling services (Класс услуг передачи данных без поддержки реального масштаба времени с опросом на передачу);
<b>nVOD</b>	Near Video on Demand (Почти Видео по запросу);
<b>OFDM</b>	Orthogonal frequency-division multiplexing (Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов);
<b>OSD</b>	On Screen Display (Всплывающие окна);
<b>PMP</b>	Point-to-multipoint (Точка- многоточек );
<b>PRFR</b>	Password Retrieval Failure Ratio (Относительное число неудачных попыток получения пароля);
<b>PTP</b>	Point-to-point (Точка-точка );



<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation (Квадратурная амплитудная модуляция);
<b>QoS</b>	Quality of Service (Качество обслуживания);
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying (Квадратурная фазовая манипуляция);
<b>RAFR</b>	Re-accessibility Failure Ratio (Относительное число неудачных попыток повторного доступа);
<b>RAT</b>	Re-accessibility Time (Время попытки повторного доступа);
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indication (Уровень мощности принимаемого сигнала);
<b>rtPS</b>	The real-time polling services (Класс услуг передачи данных в реальном времени с опросом на передачу);
<b>SAFR</b>	Service Access Failure Ratio (Относительное число неудачных попыток доступа к услуге);
<b>SAT</b>	Service Access Time (Время доступа пользователя к услуге);
<b>SNR</b>	Signal-to-noise ratio (Отношение сигнал-шум);
<b>sVOD</b>	Subscribed Video on Demand (Видео по запросу, по подписке);
<b>TDD</b>	Time division duplex (Дуплекс с временным разделением);
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access (Множественный доступ с разделением по времени);
<b>TS</b>	Time Shift (Сдвиг по времени);
<b>UAFR</b>	User Access Failure Ratio (Относительное число неудачных попыток доступа абонентской станции к сети);
<b>UAT</b>	User Access Time (Время доступа пользователя к сети);
<b>UGS</b>	Unsolicited Grant Service (Класс услуг передачи данных с постоянной скоростью);
<b>UI</b>	User Interface (Потребительский интерфейс);
<b>UL</b>	Up Link (Восходящий канал);
<b>VOD</b>	Video on demand (Видео по запросу);
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access (Всемирное взаимодействие сетей для беспроводного доступа в микроволновом диапазоне);
<b>АС</b>	Абонентская станция;
<b>БС</b>	Базовая станция;
<b>ЛВС</b>	Локальная вычислительная сеть;
<b>ЭМС</b>	Электромагнитная совместимость.

## Список используемой литературы

- 1 Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 384 с.
- 2 Электронный портал «Молодежная электронная научная школа-конференция «Актуальные проблемы защиты информации и информационной безопасности» Ставропольского Государственного университета. Гимбицкий В.А. «Цели и задачи беспроводной технологии WiMAX». <http://stavkombez.ru/conf/2012/05/03/цели-и-задачи-беспроводной-технологии/> (дата обращения: 10.04.15)
- 3 Alcatel-Lucent Технология WiMAX: на перекрестке телекоммуникационных путей // Информационные Телекоммуникационные Сети. – 2008. - № 5. – С. 14-18.
- 4 Лукоев О. WiMAX – беспроводные безграничные возможности// Connect!.- 2005г.- №6.
- 5 В.Г. Васильев. Технология фиксированного широкополосного беспроводного доступа WiMAX стандарта IEEE 802.16-2004. – М.: «UNIDATA», 2009. – 91 с.
- 6 Архипкин А. Стандарт WiMAX: техническое описание, варианты реализации и специфика применения// Беспроводные технологии. -2006г. № 3
- 7 Тихвинский В.О., Терентьев С.В.Инновационный анализ технологий беспроводного широкополосного доступа//Телеком/Сети и средства связи. – Специальный выпуск Сети доступа. – №1.– 2007, с.86-93.
- 8 Fantacci, R., Marabissi, D., Tarchi, D., Habib, I., Dept. ofElectron.&Telecommun., Univ. of Florence, Firenze, Italy «Adaptive modulation and coding techniques for OFDMA systems»; IEEE Transactions on Wireless Communications, September 2009, vol. 8, iss. 9, pp. 4876 – 4883.
- 9 Марченко С. Источники уязвимостей в сетях беспроводной связи // АДЭ. 2004. № 13.
- 10 Тихвинский В., Нургожин Б., Управление качеством услуг в сетях WiMAX// Информационные Телекоммуникационные Сети. – 2008. - № 10. – С. 26-32.
- 11 Чегринец В.А. Wi-Fi, WiMAX –реалии эффективного QoS/Материалы международной конференции Wireless Broadband 2007, [www.wirelessbroadband.ru](http://www.wirelessbroadband.ru). (дата обращения: 12.06.15)
- 12 Тихвинский В.О., Терентьев С.В.Управление и качество услуг в сетяхGPRS/UMTS. – М.: Эко-Трендз, 2007.– 400 с.
- 13 Электронный сайт журнала PCMagazine// Новиков И. Качество обслуживания QoS в WiMAX. 2009г. [http://www.pcmag.ru/solutions/sub\\_detail.php?ID=42535&SUB\\_PAGE=4](http://www.pcmag.ru/solutions/sub_detail.php?ID=42535&SUB_PAGE=4) (дата обращения: 01.08.15)
- 14 Гергес М.С. Улучшение качества передачи IPTV-услуги видео по запросу через широкополосную сеть доступа// Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия. – 2011г. С. 79-88

15 Сайт [http://broadcasting.ru /Oborandteh/interakt\\_tv\\_nov\\_koncepc\\_tv\\_uslug](http://broadcasting.ru/Oborandteh/interakt_tv_nov_koncepc_tv_uslug) «Интерактивное телевидение: новая концепция телевизионных услуг» Эдуард Черкасов, Генеральный директор ООО "Медиа Стиль" (дата обращения: 15.09.15)

16 Васильев В. Г. Сети WiMAX сегодня и завтра// Сети и телекоммуникации. – 2007г. - №06

17 SI3000 Мультисервисный узел абонентского доступа. Руководство по установке базовой станции. - Iskratel Крань Словения, 2011. – 42 с.

18 Техническая документация стандарта IEEE 802.16d наWiMAXForum: <http://wimaxforum.ru/technology/technical/> (Дата использования: 16.09.15)

19 802.16\_2004 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16, Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems " June 24, 2004,219\_217.

20 Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: «Техносфера», 2005. – 592 с.

21 ETSI TS 102250-1. Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 1: Identification of Quality of Service aspects.

22 Тихвинский В.О., Терентьев С.В.Параметры качества услуг в сетях WiMAX // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2007. № 5-6. С. 41-47

23 Результаты полевых испытаний по оценке пропускной способности и качества канала связи РТР в условиях LOS и near LOS на оборудовании Wi-Fi 802.11n MIMO и MAXBridge 50 Fixed WiMAX 802.16-2004.// UNIDATA.Январь 2010

24 Da Teng, Shou-Bao Yang, Wei-Qing He, Yun Hu QoS-TEOS: QoS Guaranteed Throughput-Efficiency Optimal Distributed Scheduling in WiMAX Mesh Networks// Journal of Computer Science and Technology, September 2010, vol. 25, Number 5, pp. 970-981

25 Выбор оптимального метода модуляции сигнала в современных цифровых системах радиосвязи// Физический факультет Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова. – Москва 2008 г. 52 с.

26 IEEE 802.16e- 2005 andIEEE 802.16-2004/Cor1 –2005. IEEE standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Amendment 2.

27 Шаповалов А. А. Использование беспроводных сетей стандарта IEEE802.16 для построения канала передачи информации в системах управления безопасностью мореплавания// ФГОУ ВПО Морская Государственная Академияимени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск. – 2010г. С. 294-320

28 ECC Report 100, Compatibility studies in the band 3400-3600 MHz between BWA systems and other services. Bern, February 2007

29 Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие /— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 179 с.

30 В. С. Сюваткин, В. И. Есипенко, И. П. Ковалев, В. Г. Сухоревров. WiMAX - технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение/ - СПб.: Изд-во БХВ Петербург, 2005. – 356 с.

31 Богданов Е.Ю., Рыбаков В.К. Влияние интерференции OFDMканалы связи сети широкополосного доступа WiMAX// Самарский Государственный Технический Университет. – 2008г.

32 Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз,2005. – 392 с.

33 Шалаев И.Г., Дмитриев В.Н. Особенности расчета параметров сети стандарта IEEE 802.16e / Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-23: сб. трудов XXIII Междунар. научн. конф.: в 12 т. Т.7. Секция 8 / под общ.ред. В.С. Балакирева. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 216 с.

34 Кузеванов А.А. Обеспечение QoS в радиосети передачи данных// Технологии и средства связи. – 2006г. - №2

35 Шахнович И. Архитектура сети WiMAX: основные элементы и принципы// Первая мила. – 2009г. - №1. С. 2-10.

## Приложение А

### Окно расчетов, выполненных с помощью программы MathCAD

Mathcad - [Untitled:1]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

Рассчитаем эффективную ширину спектра по формуле

$$BW_{ef} = BW \cdot n$$

$$BW := 7 \cdot 10^6 \quad n := \frac{8}{7}$$

$$BW_{ef} := BW \cdot n$$

$$BW_{ef} = 8 \times 10^6$$

$$SNR_{64QAM34} := 24.4$$

$$bw_{ef} := 8$$

$$SNR_{64QAM23} := 21$$

$$SNR_{16QAM34} := 16$$

$$SNR_{16QAM12} := 13$$

Чувствительность приемника при BER < 10 <sup>-6</sup> , дБм	BPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 3/4	16QAM 1/2	16QAM 3/4	64QAM 2/3	64QAM 3/4
BC	-94	-91	-88	-85	-82	-78	-76
AC	-96	-93	-90	-87	-84	-80	-78

Рассчитаем пороговый уровень чувствительности только для на и более спектрально эффективных видов модуляции QAM, способных поддерживать установленную скорость для triple play, без ухудшения качества

$$Rx_{64QAM34} := -102 + SNR_{64QAM34} + 10 \log(bw_{ef})$$

$$Rx_{64QAM34} = -68.569$$

$$Rx_{64QAM23} := -102 + SNR_{64QAM23} + 10 \log(bw_{ef})$$

$$Rx_{64QAM23} = -71.969$$

$$Rx_{16QAM34} := -102 + SNR_{16QAM34} + 10 \log(bw_{ef})$$

$$Rx_{16QAM34} = -76.969$$

$$Rx_{16QAM12} := -102 + SNR_{16QAM12} + 10 \log(bw_{ef})$$

$$Rx_{16QAM12} = -79.969$$

Trace Window - Untitled:1

Mathcad - [Untitled:1]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

Rx16QAM34 = -76.969  
 Rx16QAM12 := -102 + SNR16QAM12 + 10log(bwef)  
 Rx16QAM12 = -79.969

Каждая система характеризуется параметром, называемым системным усилением System Gain, определяющим максимальную дальность связи. Системное усиление определяется как

Tx := 30  
 Rx := -78  
 SystemGain := Tx - Rx

где Tx - выходная мощность передатчика системы;  
 Rx - чувствительность приемника системы.  
 SystemGain = 108

Спектральная плотность теплового шума Power Spectral Density (PSD) приемника составляет

Nf := -7  
 kT0 := 5·10<sup>-13.7</sup>      -137  
 N<sub>bw</sub> := 10log(kT0) + Nf  
 N = 136.99

Ifloor := -N + 30 + 10log(7) - 6  
 Ifloor = -104.539  
 +

Trace Window - Untitled:1

*Продолжение приложения А*

Mathcad

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

При отсутствии интерференции чувствительность приемника на модуляции 64QAM ¼ равна

R<sub>x 64QAM34</sub> = N + SNR<sub>64QAM34</sub> + 10log(BW<sub>эф</sub>) + Implementation Loss

Rx64Qam23 := 21  
 Rx16Qam34 := 16  
 Rx16Qam12 := 13

CI64QAM23 := Rx64Qam23 + 6  
 CI64QAM23 = 27  
 CI16QAM34 := Rx16Qam34 + 6  
 CI16QAM34 = 22  
 CI16QAM12 := Rx16Qam12 + 6  
 CI16QAM12 = 19  
 +

Ifloor := -107 + 10log(7) + 5 = -93.549  
 Rx64qam34 := -68.57  
 SNR64qam34 := 24.4

Для BW=7 МГц и R<sub>x 64QAM34</sub> = -68.57 дБм пороговый уровень интерференции I<sub>FLOOR, BW=7</sub>, равный максимальной мощности интерференции I<sub>FLOOR, BW=7</sub> в канале шириной BW=7 МГц, приводящей к деградации реальной чувствительности системы на 1 дБ, равен:

Ifloor64 := Rx64qam34 - SNR64qam34  
 Ifloor64 = -92.97

Mat

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

IFloor64 = -92.97

Коэффициент дискретизации  $p$  определяет интервал между поднесущими (вместе с шириной полосы и количеством поднесущих данных), и полезное время символа, для полосы частот 7 МГц он равен  $8/7$

$N_{dan} := 192$

$N_{pilot} := 8$

Тогда по формуле (3.23) найдем число используемых поднесущих  $N_{исп}$

$N_{isp} := N_{dan} + N_{pilot}$

$N_{isp} = 200$

По формулам (3.21) и (3.22) рассчитаем скорость передачи данных по направлению вниз и вверх для используемых типов модуляции

$R_{DL64QAM3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 3/4 6 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 22.46$   
 $R_{UL64QAM3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 3/4 6 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 9.98$   
 $R_{DL64QAM2/3} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 2/3 6 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 19.97$   
 $R_{UL64QAM2/3} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 2/3 6 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 8.88$   
 $R_{DL16QAM3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 3/4 4 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 14.98$   
 $R_{UL16QAM3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 3/4 4 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 6.65$   
 $R_{DL16QAM1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 1/2 4 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 10.03$   
 $R_{UL16QAM1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 1/2 4 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 4.41$   
 $R_{DLQPSK3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 3/4 2 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 7.49$   
 $R_{ULQPSK3/4} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 3/4 2 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 3.37$   
 $R_{DLQPSK1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 1/2 2 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 4.99$   
 $R_{ULQPSK1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 1/2 2 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 2.21$   
 $R_{DLBPSK1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (120/256) 1/2 1 [1 - (1/20 + 1/16)] 1.5 = 2.48$   
 $R_{ULBPSK1/2} = 7 \cdot 10^6 \cdot 8/7 (80/256) 1/2 1 [1 - (1/20 + 1/16)] 1 = 1.12$

Trace Window - Untitled:1