

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 работы беспроводной сети передачи данных в условиях загруженного радиоэфира на частоте 5 ГГц в городе Алматы»

Магистрант: Ахметова Д.Р. \_\_\_\_\_ 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., зав. кафедрой «РЭТ»  
КазНТУ им. К.Сатпаева \_\_\_\_\_ Касимов А.О.  
(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

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

Факультет: «Радиотехники и связи»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные системы»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Ахметовой Дилярям Раимжановне  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Исследование работы беспроводной сети передачи данных в условиях загруженного радиозэфира на частоте 5 ГГц в городе Алматы»

утверждена Ученым советом университета № 141 от «28» октября 2014 года

Срок сдачи законченной диссертации «   » \_\_\_\_\_

Цель исследования: Определение зависимости между процентом загрузки канала и скоростью передачи информации с использованием спектрального анализатора AirView Ubiquiti Networks (UBNT).

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Обзор технологии AirMax от UBNT \_\_\_\_\_
2. Безопасность беспроводных сетей \_\_\_\_\_
3. Технические характеристики Ubiquiti NanoStation M5 \_\_\_\_\_
4. Описание работы спектрального анализатора AirView Ubiquiti Networks (UBNT) \_\_\_\_\_
5. Обработка экспериментальных данных и расчеты \_\_\_\_\_

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рисунок 1 – Сеть точка-многоточка;

Рисунок 2 – Частотный диапазон – 5 ГГц;

Рисунок 3 – Окно программы Ubiquiti AirView;

Рисунок 4 – Структура сети связи Airmax на основе базовых станций Ubiquiti Nanostation M5 в г. Алматы;

Рисунок 5 – Окно программы Ubiquiti AirView – Сканирование частотного диапазона 5 ГГц.

Таблица 1 – Значения индекса модуляции;

Таблица 2 – Технические характеристики NanoStation M5 от UBNT;

Таблица 3 – Результаты эксперимента

Рекомендуемая основная литература:

1. Станислав Рыбалко. Беспроводные сети. Практическое руководство. Издание седьмое, обновленное. - Москва, 2012 г.

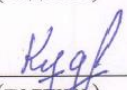
2. Savo Glisic, Beatriz Lorenzo Advanced Wireless Networks: Cognitive, Cooperative & Opportunistic 4G Technology. Wiley – 2011.

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

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Информационный обзор технологии AirMax от UBNT	30.10.2014	
2. Изучение оборудования. Беспроводные точки доступа. Технические характеристики Ubiquiti NanoStation M5	20.10.2014	
3. Проведение эксперимента с использованием спектрального анализатора AirView	09.11.2015	
4. Определение расстояния между БС и ТД с помощью модели Окомура и Хата	30.11.2015	
5. Общий анализ теоретических расчетов и экспериментальных данных	30.12.2015	

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) (Ахметова Д.Р.)  
(Ф.И.О.)

## **Аннотация**

В данной магистерской диссертации исследовалась работа беспроводной сети передачи данных по технологии AirMax в условиях загруженного радиоэфира на частоте 5 ГГц в городе Алматы.

Цель исследования – определить зависимость между процентом загруженности канала и скоростью передачи информации.

Анализ данных, полученных при проведении экспериментов с использованием спектрального анализатора AirView UBNT, а также данных теоретических расчетов позволил определить:

- 1) потери в зависимости от расстояния между БС и ТД;
- 2) мощность сигнала на приеме в точке доступа;
- 3) зависимость между процентом загруженности канала и скоростью передачи данных.

## **Аңдатпа**

Аталмыш магистрлік диссертацияда Алматы қаласындағы жиілігі 5 ГГц-ті құрайтын жүктеулі радиоэфир жағдайында AirMax технологиясы бойынша мәліметтерді жіберудің сымсыз жүйесінің жұмысы зерттелді.

Зерттеудің мақсаты – жүктемесі мол арна пайызы мен ақпарат тарату жылдамдығы пайызы арасындағы тәуелділікті анықтау.

AirView (UBNT) спектрлік анализаторының пайдаланылуымен эксперимент жасау барысында алынған деректер анализі мен теориялық есептеу мәліметтері:

- 1) азалық станса мен қатынасу нүктесі арасындағы арақашықтыққа қатысты шығыстың пайда болатындығын;
- 2) қатынасу нүктесіндегі қабылдағыш дабылының қуаттылығын;
- 3) жүктемесі мол арна пайызы мен ақпарат тарату жылдамдығы пайызы арасындағы тәуелділікті анықтауға мүмкіндік туғызды.

## **Annotation**

In this master's thesis was studied the work of wireless data transmission by AirMax technology in conditions of radio broadcast in congested 5 GHz in the city of Almaty.

The purpose of research - to determine the relationship between the percentage of traffic channel and the speed of information transfer.

The analysis of the information acquired during the conduction of several experiments with applying of spectrum analyzer AirView (UBNT), as well as data acquired during theoretical computation has allowed us to establish:

- 1) loss based on the distance between the base station and the access point;
- 2) the signal power at a reception at the access point;
- 3) establish the relationship between the percentage of traffic channel and the speed of information transfer.

## Содержание

Введение	7
1 Технология AirMax от UBNT	8
1.1 Основные преимущества технологии AirMax от UBNT	8
1.2 Преимущества беспроводной связи от AirMax	9
1.3 Особенности работы поллинга в технологии AirMax	9
1.4 TDMA-доступ к радиоканалам	11
1.5 Конфигурация MIMO в AirMax	13
2 Стандарт IEEE 802.11	16
2.1 Стандарт IEEE 802.11a	16
2.2 Стандарт IEEE 802.11n	17
2.3 Базовые положения стандарта IEEE 802.11n	19
2.3.1 Концепция 802.11n	19
2.3.2 Многоканальный вход/выход (MIMO)	20
2.3.3 Ширина полосы пропускания канала 40 МГц	20
2.3.4 Режимы работы 802.11n	22
2.3.5 Индекс модуляции и схемы кодирования (MCS)	23
2.3.6 Сравнение стандартов IEEE 802.11	26
3 Безопасность беспроводных сетей	26
3.1 Механизмы обеспечения безопасности сетей стандарта 802.11	26
3.1.1 Открытая аутентификация	27
3.1.2 Аутентификация с общим ключом	27
3.1.3 Аутентификация по MAC-адресу	27
3.2 Механизм шифрования WEP	28
3.3 Уязвимость защиты 802.11.	28
4 Беспроводные точки доступа	30
4.1 Технические характеристики Ubiquiti NanoStation M5	32
5 Экспериментальная часть	37
5.1 AirView — анализатор частотного диапазона	37
5.2.1 Обзор графиков AirView	39
5.2 Описание работы спектрального анализатора AirView Ubiquiti Networks (UBNT)	39
5.3 Исследование работы беспроводной сети передачи данных в условиях загруженного радиоэфира на частоте 5 ГГц в городе Алматы	42
5.3.1 Расчет параметров сети передачи данных	44
5.3.2 Определение расстояния между БС и ТД, учет потерь при распространении радиоволн	45
5.3.3 Модель Окомура и Хата	49
5.3.4 Обработка экспериментальных данных	53
Вывод	57
Заключение	58
Список сокращений	59

Список литературы	60
Приложение А Местоположение БС и ТД, рельеф местности на этом участке	62
Приложение Б Сканирование частотного диапазона 5 ГГц в г. Алматы при проведении экспериментов	63
Приложение В Скорости передачи данных	71
Приложение Г Графическое представление расчетов в программной среде MathCAD	72

## Введение

Тенденции развития телекоммуникационных технологий в XXI веке свидетельствуют о том, что человечество движется по пути эффективного формирования мирового информационного общества, т.е. такого общества, в котором инфокоммуникации будут определять новый этап усовершенствования в экономической, научной, культурной и общественной сферах деятельности.

Все большую популярность среди специалистов и потребителей услуг связи завоевывают технологии беспроводного радиодоступа.

На сегодняшний день технологии беспроводной сети передачи данных стремительно выходят на первый план, благодаря:

- новым методам формирования и обработки сигналов;
- усовершенствованным сценариям предоставления услуг связи;
- снижению стоимости оборудования и упрощению его применения.

Также самым важным аргументом «за» радиодоступ является постоянное увеличение пропускной способности, доступной каждому пользователю [1].

Беспроводные сети передачи данных получили широкое распространение в повседневной жизни, и динамика процесса распространения такова, что число беспроводных сетей будет только возрастать и увеличиваться. Значимость и ценность информации передаваемой по беспроводным сетям растет вместе с количеством информации. Поэтому неудивительно, что в настоящее время беспроводные широкополосные технологии радиодоступа переживают истинный подъем своего развития [2,3].

*Целью данной работы* является определение зависимости между процентом загруженности канала и скоростью передачи информации.

*Задачи:*

- 1) рассчитать потери в зависимости от расстояния между БС и ТД;
- 2) определить величину мощности соседних БС по спектрограмме загруженности частотного диапазона, снятой с помощью программы AirView;
- 3) установить зависимость между процентом загруженности канала и скоростью передачи информации.

## **1 Технология AirMax от UBNT**

Ubiquiti Networks (UBNT) – американская фирма, знаменитая своими качественными и уникальными решениями в сфере беспроводных технологий, выпустила в свет новейшую технологию под названием AirMax, включающую в себя поддержку стандарта 802.11 a/n, а также уникальную систему поллинга.

*Поллинг* представляет собой маркерный доступ, устраняющий возможные коллизии при соединении с беспроводной сетью.

*Технология AirMax* – это особый радио-протокол, позволяющий работать с беспроводными сетями, имеющими основную частоту радиосигнала 2,4-5 ГГц [4].

Новейшая беспроводная широкополосная технология AirMax, разработанная фирмой UBNT, делает возможным обеспечение скорости TCP/IP более 150 Мбит/с вне помещений. При помощи данной технологии можно развернуть беспроводную сеть, которая будет обладать высокой пропускной способностью, высоким качеством передачи голоса и малой задержкой. Решение использует протокол TDMA с аппаратным ускорением.

Беспроводная сеть, которая создана благодаря технологии AirMax, может быть масштабирована до сотен клиентов на каждую базовую станцию (БС). Возможно это благодаря применению технологии MIMO [5].

### **1.1 Основные преимущества технологии AirMax от UBNT**

Применение протокола AirMax дает некоторые главные преимущества пользователям.

*Масштабируемость беспроводной сети передачи данных.*

Использование AirMax устранит снижение качества канала связи в условиях одновременного пользования большим количеством клиентов. Если в сети 802.11, реализуемой по технологии Wi-Fi, рекомендуется одновременное подключение не более 20 абонентов, то благодаря технологии AirMax в одно время могут работать сразу до 120 пользователей.

Данное достижение стало возможным за счет изменения принципа передачи информации на MAC уровне. В Wi-Fi сетях степень занятости канала может быть определена при помощи базы информации о наличии несущей. В AirMax же применяется технология опроса клиентов сети базой (поллинга). Эта технология решила проблему «скрытых узлов» - когда 2 абонента сети одновременно пытаются послать сигнал, т.к. при прослушивании эфира "не слышат" друг друга по причине удаленности или других факторов [6].

*Возможность максимально уменьшить задержку для передачи голоса и видео.*

Алгоритмы опроса клиентов сети дают возможность определения тех клиентов, которые передают чувствительные к задержке видео и голос, и наделяют их особым приоритетом по отношению к остальным [6].



### *Достижение высокой скорости передачи данных.*

Данное достижение стало возможным благодаря использованию технологии ММО, которая дарит возможность увеличения скорости передачи информации на физическом уровне (РНУ).

Уникальной же разработкой американской фирмой UBNT стали кроссполяризационные антенны, технические характеристики которых максимально приближены к антеннам операторского сегмента. Эти антенны прошли специальные тесты на совместимость с устройствами Ubiquiti Networks (UBNT), отличающимися поддержкой AirMax. Сделано это с целью оптимизации, усовершенствования и улучшения характеристик радиоканалов [6].

## **1.2 Преимущества беспроводной связи от AirMax**

К основным преимуществам беспроводных сетей можно отнести: несложную установку, экономичность и качество [7].

### *Несложная установка.*

Когда не требуется прокладывать физические провода до рабочего офиса, процедура установки может быть быстрой и экономически эффективной. Беспроводная радиосвязь упрощает также подключение труднодоступных объектов, таких как заводские помещения, склады.

### *Экономичность.*

Развертывание беспроводной сети обходится гораздо дешевле, поскольку при этом ликвидируются проблемы, связанные с организацией прокладки проводов и затраты, необходимые для этого процесса.

### *Качество.*

Качество беспроводной связи остается на высшем уровне, независимо от климатических условий. Работая в частотном диапазоне, не доступном для обычных радиоустройств, беспроводная связь от AirMax не знает таких понятий как «помехи», «шумы» или «пересечение частот» [7].

## **1.3 Особенности работы поллинга в технологии AirMax**

Поллинг представляет собой маркерный доступ, устраняющий возможные коллизии при соединении с беспроводной сетью. Начал применяться в начале 90-х годов XX века в беспроводных сетях. Одной из технических особенностей которого, можно отметить то, что он не стандартизирован, то есть каждый производитель оборудования может писать свою версию [8].

### *Преимущества поллинга в технологии AirMax.*

Использование поллинга позволяет:

- предотвращать возникновение коллизий;
- обеспечивать беспрепятственный доступ к базе;
- управлять производительностью каждого абонента;
- обеспечивать качественную работу даже для дальних пользователей.

### *Недостатки поллинга в технологии AirMax.*

Поллинг требует современных и мощных процессоров. Если платформа «слабая» — очень заметно снижается производительность базы.

Реализация поллинга – дело особенное, и не у всех производителей беспроводного оборудования это получается на уровне.

При большой удаленности абонентов друг от друга, например, при развертывании провайдерских сетей точка-многоточка, возникает проблема, заключающаяся в том, что абоненты Wi-Fi, находясь на значительном расстоянии, перестают слышать сигнал друг от друга. В результате устройства клиентов начинают трансляцию одновременно и возникают так называемые коллизии — наложение пакетов данных друг на друга и, как следствие, неизбежные ошибки [8].

Для решения подобных проблем была разработана технология, называемая TDMA поллинг, которую использует AirMax. Суть данной технологии заключается в том, что при работе с протоколом AirMax базовая станция (БС) сама определяет очередность работы абонентов, выделяя каждому подключенному устройству свой временной слот для передачи данных. Благодаря такой схеме контроля со стороны БС возникновение коллизий исключается и заметно улучшается качество приема-передачи данных (ППД) (рисунки 1.1 – 1.2).



Рисунок 1.1 – Сеть точка-многоточка



Рисунок 1.2 – TDMA поллинг

### *Особенности работы поллинга в AirMax.*

Во время работы AirMax, передача данных проводится не зависимо от перегруженности радиосреды. Это становится возможным при помощи автоматической синхронизации временных интервалов приема/передачи данных (ППД).

Также, возможен приоритет определенному устройству (клиенту), тем самым фирмой UBNT удалось внедрить в технологию систему двойного TDMA. В итоге, чем выше приоритет, тем большее число слотов данных передается.

Технология AirMax позволила в несколько раз повысить скорость и надежность беспроводного канала радиосвязи [8].

### **1.4 TDMA-доступ к радиоканалам**

Основное различие при активации режима AirMax, устройства серии "М" вместо CSMA (множественный доступ с контролем несущей) переходят на TDMA (множественный доступ с временным разделением).

TDMA (*англ. Time Division Multiple Access — множественный доступ с разделением по времени*) — метод использования радиочастот, когда в одном частотном интервале находятся несколько пользователей, различные пользователи используют разные временные слоты (интервалы) для передачи данных. Является приложением мультиплексирования канала с разделением по времени (TDM — Time Division Multiplexing) к радиосвязи.

Таким образом, TDMA обеспечивает каждому абоненту полный доступ к интервалу частоты в течение короткого промежутка времени. При этом не происходит интерференция, так как каждому абоненту в пределах каждого канала выделяются определенные тайм-слоты (промежутки времени).

Протокол TDMA защищен от проблем коллизий, возникающих при очень зашумленном эфире. БС в режиме TDMA выдаёт каждому абоненту определённый тайм-слот для передачи, одновременная передача абонентами этой БС в общем случае не возможны.

Следующим плюсом AirMax режима, это TDMA VoIP/VideoQoS интеллектуальный планировщик. Данный алгоритм автоматически определяет, VoIP и видео пакеты и дает им высокий приоритет.

В AirMax режиме так же добавлен функционал Dual TDMA. Этот функционал позволяет назначать разный приоритет для клиентов с плохим уровнем сигнала и для "хороших" клиентов. Это исключает проблемы "медленного клиента", которые снижают общую производительность всех абонентов базовой станции (БС).

TDMA также поддерживает большое количество разнообразных сервисов, ориентированных на конечного пользователя, таких как передача голосовых и факсимильных сообщений, сервис SMS. Технология TDMA предлагает гибкий эфирный интерфейс, демонстрируя свои исключительные эксплуатационные качества: высокую емкость, широкий охват, неограниченную поддержку свободно перемещающихся абонентов и большое многообразие других современных сервисов.

#### *Принцип TDMA в AirMax.*

В принципе действия TDMA лежит преобразование аудио-сигнала в цифровой сигнал; этот сигнал затем разделяется на некоторое число пакетов длительностью в несколько миллисекунд каждый. На короткий период времени назначается один частотный канал, после происходит переброска сигнала на другой канал. Цифровые фрагменты из одного передатчика занимают разные тайм-слоты в нескольких полосах одновременно [9].

В используемом в TDMA методе доступа три пользователя одновременно делят несущую частоту в 30 кГц. Сейчас TDMA является доступной, одобренной к применению технологией, коммерчески используемой во многих системах.

Используемые в настоящее время системы дают возможность 6-кратного уплотнения сигнала (повышения емкости).

#### *Преимущества TDMA в AirMax.*

Главным и самым основным является то, что помимо повышенной эффективности передачи сигнала:

- метод TDMA может быть легко адаптирован как к передаче данных, так и к голосовой коммуникации;
- TDMA обеспечивает возможность поддержки скорости передачи данных от 64 кбит/с до 120 Мбит/с.

Данное преимущество позволяет операторам предлагать пользователям персональные коммуникационные сервисы, включая факсимильную связь, голосовую почту, SMS, а также такие приложения, как мульти-медийные сервисы и видео-конференции.

В отличие от методов, при которых качество радиосвязи может страдать из-за интерференции сигналов от различных абонентов, передающих в одно и то же время, технология TDMA, которая разделяет пользователей во времени, дает гарантию, что передаваемые ими сигналы не будут подвержены интерференции с другими сигналами [9].

Внедрение TDMA дает возможность значительной экономии при оборудовании базовых станций (БС) и при поддержке, а также в плане использования пространства.

*Недостатки TDMA в AirMax.*

Одним из существенных минусов TDMA является то, что каждый абонент имеет предварительно заданный тайм-слот. Поэтому пользователи, переходящие в процессе разговора от одной сотовой ячейки к другой не имеют возможности сохранять назначенный тайм-слот. Таким образом, если все тайм-слоты в следующей соте в данный момент времени оказываются занятыми, то разговор может быть прерван.

Подобным же образом, если все тайм-слоты в конкретной соте, в которой абоненту случилось находиться в текущий момент времени, оказываются занятыми, пользователь не имеет возможности принять звонок.

Следующей проблемой, связанной с TDMA, является многоканальное искажение. Сигнал, который приходит с вышки на сотовый телефон, может поступать с любого из нескольких направлений.

До того, как сигнал достигнет абонента, он может успеть отразиться от находящихся там зданий и объектов, что может вызвать интерференцию – помехи.

Одним из способов предотвращения такой интерференции является задание в системе ограничений по времени. Система будет принимать, обрабатывать и передавать сигнал в пределах строго определенного интервала времени. После истечения назначенного предела времени система будет игнорировать сигналы.

Однако надо помнить, что все сотовые архитектуры, созданы ли они на микросотах или макросотах - имеют свой собственный уникальный набор проблем, который влияет на распространение радиосигнала [9].

### **1.5 Конфигурация MIMO в AirMax**

Протокол AirMax использует антенную конфигурацию MIMO, благодаря которой достигаются высокие показатели пропускной способности беспроводного радиоканала. Также главным преимуществом AirMax являются широкие возможности масштабирования сети [10].

*MIMO (Multiple Input Multiple Output – множественный вход, множественный выход).*

MIMO – это технология, использующаяся в современных беспроводных сетях, которая предусматривает использование нескольких передатчиков и приемников для одновременной передачи большего количества данных.

Оригинальность схемы кодирования MIMO в том, что для увеличения скорости передачи в ней применены недостатки распространения радиоволн в помещениях, а именно эффект множественного отражения и интерференции радиоволн. Как мы знаем, радиосигналы отражаются от объектов, что обычно приводит к интерференции и ухудшению уровня сигнала на приеме. Но данная технология использует множественные пути для передачи большего

объема информации, собираемой воедино всеми принимающими устройствами, которые поддерживают MIMO. При этом предполагается применение сложных антенных систем, работа которых основана на механизме пространственно-временной обработки сигналов (SDM). Этот термин подразумевает адаптивную обработку сигналов системой, состоящей из нескольких антенных элементов [11].

При многолучевом распространении сигнала уровень принимаемой мощности является случайной функцией, которая зависит от местоположения абонента и времени. Если же используется антенный массив, вероятность потери сигнала всеми антеннами уменьшается экспоненциально, с увеличением числа некоррелированных сигналов (или антенн). Передатчик разбивает поток данных на независимые последовательности битов и пересылает их одновременно, применяя массив антенн. Эта техника называется пространственным мультиплексированием [12].

Система с  $M$  передающими и  $M$  принимающими антеннами способна обеспечить пиковую пропускную способность теоретически в  $M$  раз большую, чем обычные системы Single Input Single Output (SISO). Сигналы, естественно, смешиваются в канале, поскольку генерируются в одном частотном диапазоне [12].

Для этого антенны передатчика и приемника должны быть достаточно далеко разнесены в пространстве и/или излучать поляризованную волну для того, чтобы образовать независимые пути распространения. "Достаточно далеко" определяется углом распространения лучей, испускаемых или принимаемых антеннами. Так, например, если многолучевые сигналы поступают со всех азимутальных направлений, то расстояния  $(0,4L—0,6L)$  км вполне достаточно для приема независимо замирающих лучей. В общем случае, чем меньше угол распространения, тем расстояние между антеннами должно быть больше.

Число передатчиков и приемников в системе может быть различным. Различают системы MIMO  $2 \times 2$  (два приемника и два передатчика в каждом устройстве),  $3 \times 2$  (три передатчика, два приемника), а также MIMO  $3 \times 3$  и  $4 \times 4$ . Дальнейшее увеличение количества приемников и передатчиков не приводит к линейному увеличению скорости передачи, поэтому сейчас системы с большим количеством приемников и передатчиков не производятся.

Кроме того, дальнейшее увеличение пропускной способности каналов связи возможно при расширении полосы. Из теоремы Шеннона следует, что теоретический предел пропускной способности "С" повышается при увеличении частотного диапазона "В" [13]:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (1.1)$$

где  $C$  — пропускная способность канала, Мбит/с;

$B$  — полоса пропускания канала, МГц;

$SNR$  — отношение сигнал-шум.

А система с N антеннами имеет теоретическую пропускную способность [13]:

$$C = N \cdot B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (1.2)$$

Очень интересную картину дает сравнение систем MIMO с различным количеством радиотрактов и разной ширины полосы канала (рисунок 1.3).

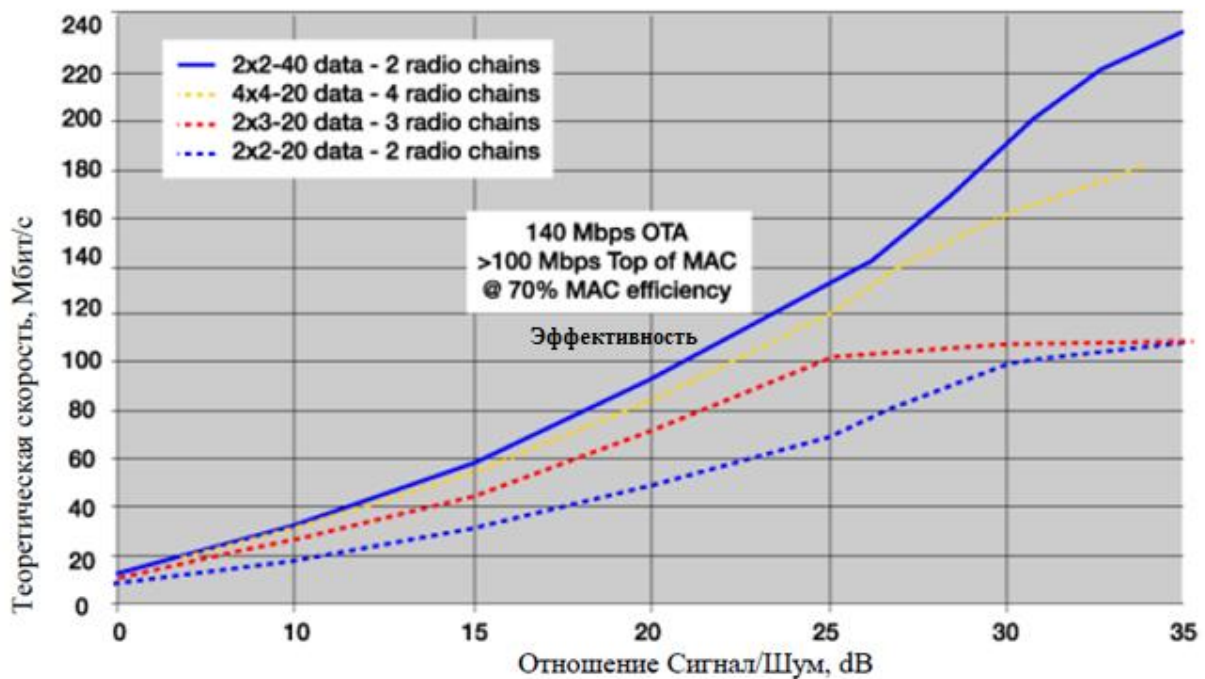


Рисунок 1.3 – Сравнение систем MIMO

На рисунке 1.3 видно, что реализация MIMO 2×3-20 имеет лучший показатель SNR, чем 2×2-20. То есть зона обслуживания базы MIMO 2×3 будет больше при равной скорости. Также по графику наглядно видно, что использование двух потоков MIMO при полосе 20 МГц не позволяет достичь цели в 100 Мбит/с реальной скорости. Для этого необходимо использовать три потока MIMO. Преимущество широкой полосы даже для MIMO 2×2 здесь очевидно. Следует обратить внимание на то, что удвоение числа RF-цепей с каналами по 20 МГц и передача четырех потоков MIMO дает меньшую производительность, чем 2 канала по 40 МГц. Так что переход на 40-МГц каналы позволит не только снизить сложность и стоимость систем, но и повысить производительность[14-15].

Как видим, применение прогрессивных, математически сложных алгоритмов кодирования позволяет значительно увеличить скорость передачи информации и сохранить при этом высокую надежность и помехоустойчивость современных беспроводных систем связи [11].

## 2 Стандарт IEEE 802.11

### 2.1 Стандарт IEEE 802.11a

После принятия стандарта 802.11b стало ясно, что емкости частотного диапазона 2,4 ГГц недостаточно. Поэтому в США и Европе был выделен новый частотный диапазон – 5 ГГц (рисунок 2.1-2.2) для организации локальной сети WLAN. Беспроводные сети данного частотного диапазона работают в соответствии с новым стандартом 802.11a. Ширина каждого частотного канала 20 МГц, а всего в диапазоне 5,15-5,95 ГГц можно разместить 40 неперекрывающихся каналов. Скорость в канале до 54 Мбит/с, метод кодирования - OFDM. Стандартом определены три поддиапазона для оборудования Wireless LAN – 5,15-5,25; 5,25-5,35 и 5,725-5,825 ГГц [11,16].

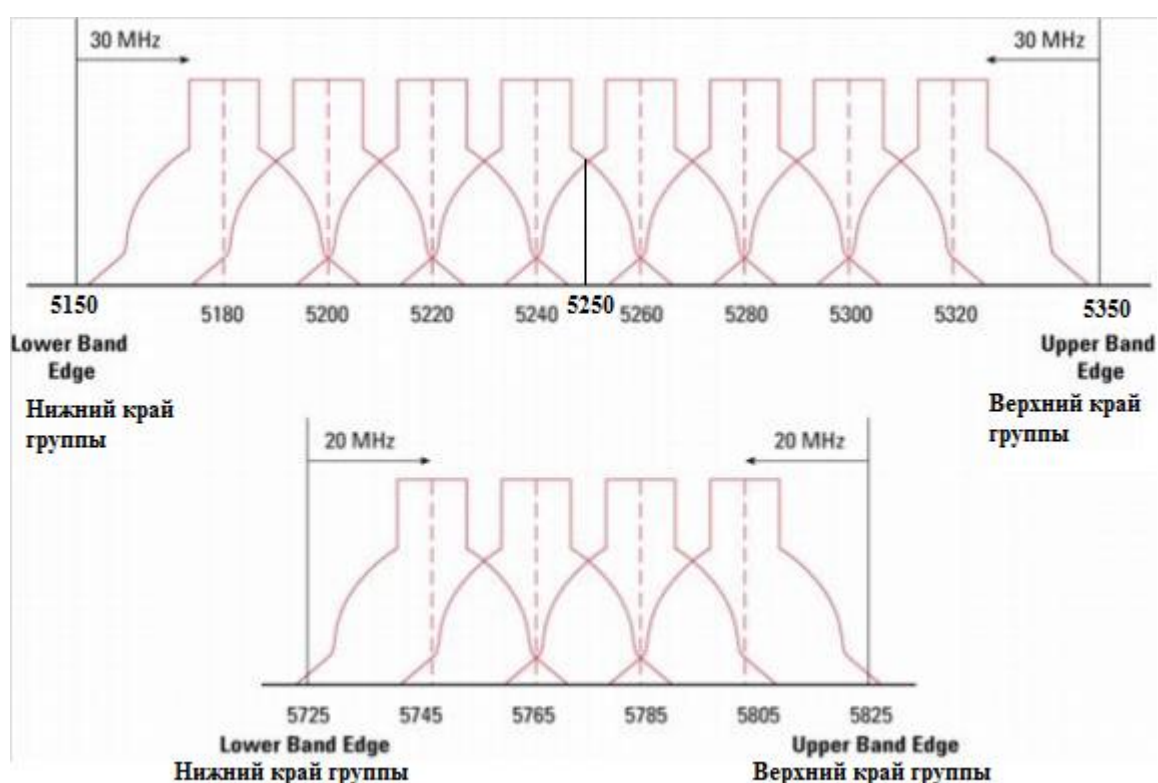


Рисунок 2.1 – Поддиапазоны оборудования Wireless LAN в технологии AirMax, ширина частотного канала 20 МГц



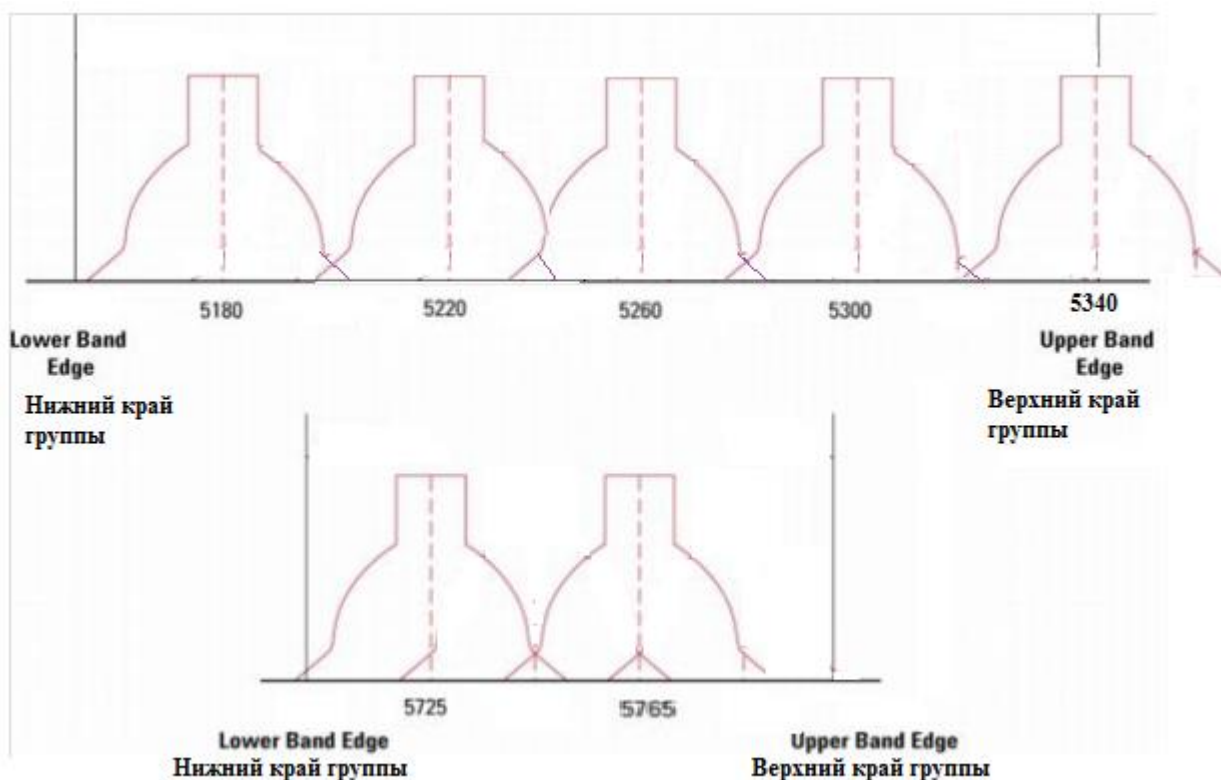


Рисунок 2.2 – Частотный диапазон – 5 ГГц, ширина частотного канала 40 МГц

## 2.2 Стандарт IEEE 802.11n

В январе 2004 года институт IEEE образовал группу «n» для работы над повышением пропускной способности беспроводных сетей (вплоть до теоретического предела в 540 Мбит/с).

Основа стандарта IEEE 802.11n – технология множественного приема и передачи сигналов - MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

MIMO означает "множественный вход, множественный выход" и обозначает технологию, в соответствии с которой устройство параллельно передает два и более потоков информации в одном радиоканале. Теоретический максимум стандарта 802.11n – 600 Мбит/с. Стандарт представляет собой следующую ступень развития беспроводных сетей.

Несколько важных характеристик про особенности и преимущества MIMO.

За счет применения нескольких пространственно разнесенных передатчиков и приемников, MIMO использует многолучевость себе во благо, в отличие от всех предыдущих стандартов, которые боролись с многолучевостью. Информация разбивается на несколько потоков, которые передаются параллельно каждым передатчиком, поэтому значительно вырастает и скорость.

Кроме радиотехнологии, для увеличения пропускной способности в стандарте IEEE 802.11n изменены доступные значения ширины канала, скорости модуляции, уменьшено количество служебной информации в кадре.

Увеличение канала до 40 МГц дало более чем двукратное увеличение скорости, поскольку удалось сэкономить на служебной информации (рисунок 2.2).

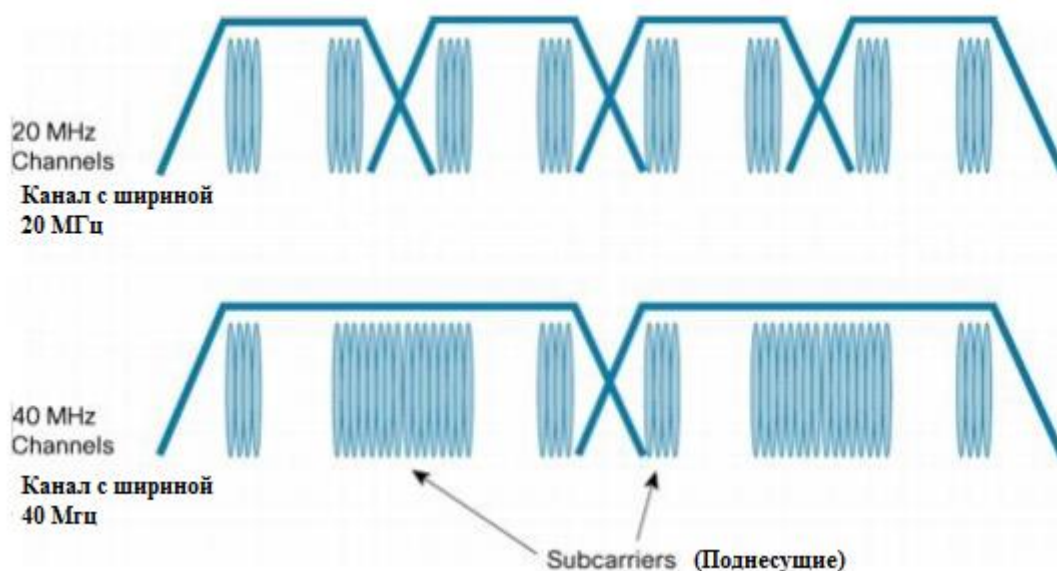


Рисунок 2.2 – Каналы шириной 20 МГц и 40 МГц

Стандарт 802.11n также как 802.11a или g, использует символ длиной 4 миллисекунды. Однако количество подканалов, несущих полезную информацию, увеличено до 52 (с 48 у 802.11g), что дало скорость каждого канала 65 Мбит/с. Это значит, что система с двумя передатчиками будет иметь максимальную скорость 130 Мбит/с, с 4-мя – 260 Мбит/с. И это все – для канала 20 МГц [17-18].

Используя канал двойной ширины – 40 МГц, количество полезных подканалов возрастает до 108, что позволяет достичь высоких скоростей от 135 до 540 Мбит/с.

Еще одна возможность увеличения скорости – различная модуляция для разных подканалов (и для разных пользователей). Это значит, что близко расположенный абонент будет работать на максимальной модуляции, а удаленный низкоскоростной абонент не будет ему мешать. До стандарта 802.11n появление далеко расположенного абонента приводило к снижению скорости работы для всех абонентов – база переходила на модуляцию этого удаленного абонента [11].

*Защитный интервал* – этот интервал был введен в стандарты 802.11 a/g именно для борьбы с многолучевостью и составляет 800 наносекунд. Стандарт 802.11n также поддерживает этот защитный интервал в целях

совместимости, но если все абоненты сети – только 802.11n, то система переходит на укороченный защитный интервал в 400 наносекунд и длительность символа сокращается с 4 до 3,6 микросекунд (мкс). Скорость при этом возрастает с 72 до 600 Мбит/с.

Обновления канального уровня на этом не заканчиваются. Введена агрегация нескольких кадров в один, а максимальная длина кадра увеличена с 4 до 64 кбайт (правда, весь этот супер-пакет должен быть предназначен одному получателю) [11].

Добавлены и специальные механизмы снижения энергопотребления.

### **2.3 Базовые положения стандарта IEEE 802.11n**

В основу стандарта 802.11n входят:

- увеличение зоны покрытия;
- увеличение скорости передачи данных;
- увеличение пропускной способности.
- увеличение надежности передачи сигнала.

#### **2.3.1 Концепция 802.11n**

Стандарт 802.11n имеет множество усовершенствований. Устройства 802.11n могут работать в одном из двух частотных диапазонов: 2,4 ГГц или 5 ГГц [19-20].

*На физическом уровне (PHY)* введена усовершенствованная обработка сигнала и модуляции, добавлена возможность одновременной передачи сигнала через 4 антенны.

*На сетевом уровне (MAC)* реализовано более эффективное использование доступной пропускной способности. Вместе эти усовершенствования позволяют увеличить теоретическую скорость передачи данных до 600 Мбит/с – увеличение более чем в десять раз, по сравнению с 54 Мбит/с стандарта 802.11a/g.

В действительности, производительность беспроводной локальной сети зависит от многочисленных факторов, таких как среда передачи данных, частота радиоволн, размещение устройств и их конфигурация. При использовании устройств стандарта 802.11n, крайне важно понять, какие именно усовершенствования были реализованы в этом стандарте, на что они влияют, а также как они совмещаются и сосуществуют с сетями устаревшего стандарта 802.11a/b/g беспроводных сетей. Важно понять, какие именно дополнительные особенности стандарта 802.11n введены и поддерживаются в новых современных беспроводных устройствах [21-22].

### 2.3.2 Многоканальный вход/выход (MIMO)

Одним из самых главных преимуществ стандарта 802.11n является поддержка технологии MIMO (Множественный вход/выход).

Благодаря технологии MIMO осуществлена возможность одновременного приема/передачи нескольких потоков данных через несколько антенн, вместо одной.

Стандарт 802.11n определяет самые различные антенные конфигурации "MxN", начиная с "1x1" до "4x4" (распространенные конфигурации: "3x3" или "2x3"). Первое число (M) определяет количество передающих антенн, а второе значение (N) определяет число приемных антенн.

Например, точка доступа с двумя передающими и тремя приемными антеннами обозначается "2x3" MIMO-устройством (рисунок 2.3).

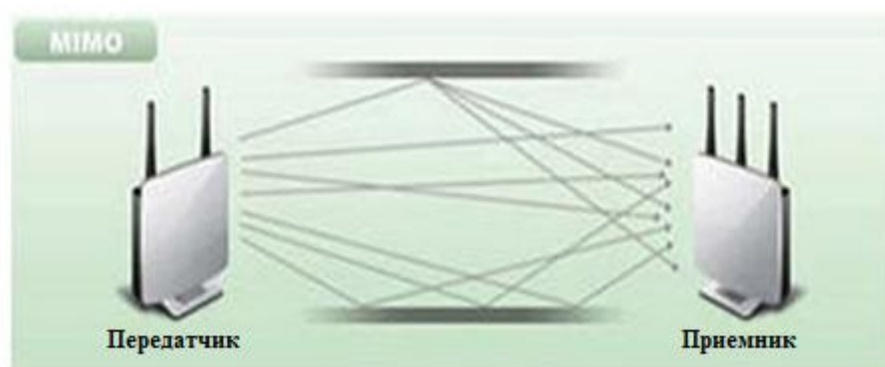


Рисунок 2.3 – Использование "2x3" MIMO-антенны

Чем больше устройство 802.11n использует антенн для одновременной работы передачи/приема, тем будет гораздо выше максимальная скорость передачи данных. Однако, само по себе использование нескольких антенн не увеличивает скорость передачи данных или расширение диапазона. Главным моментом в устройствах стандарта 802.11n является то, что в них внедрен усовершенствованный способ обработки сигнала, который и определяет алгоритм работы MIMO-устройства при использовании нескольких антенн [21].

Конфигурация "4x4" при использовании модуляции 64-QAM обеспечивает скорость до 600 Мбит/с, конфигурация "3x3" при использовании модуляции 64-QAM обеспечивает скорость до 450 Мбит/с, в то время как конфигурации "2x3" и "1x2" обеспечат скорость до 300 Мбит/с [21].

### 2.3.3 Ширина полосы пропускания канала 40 МГц

Еще одна дополнительная и важная особенность стандарта 802.11n это увеличение ширины канала с 20 МГц до 40 МГц.

В беспроводных сетях используются два частотных диапазона 2,4 ГГц и 5 ГГц. Беспроводные сети стандарта 802.11b/g работают на частоте 2,4 ГГц,

сети стандарта 802.11a работают на частоте 5 ГГц, а сети стандарта 802.11n могут работать как на частоте 2,4 ГГц, так и на частоте 5 ГГц.

В полосе частот 2,4 ГГц для беспроводных сетей доступны 13 каналов с интервалами 5 МГц между ними. Для передачи сигнала беспроводные устройства стандарта 802.11b/g используют каналы шириной 20 МГц. Беспроводное оборудование стандарта 802.11b/g использует один из 13 каналов из полосы 20 МГц в пределах частоты 2,4 ГГц, но фактически задействует 5 пересекающихся каналов. К примеру, если точка доступа использует канал 6, то она оказывает значительные помехи на каналы 5 и 7, а также оказывает помехи на каналы 4 и 8. Когда происходит передача данных устройством, сигнал отклоняется от центральной частоты канала +/- 11 МГц. В некоторых случаях происходит отклонение энергии радиочастоты до 30 МГц от центрального канала. Для предотвращения взаимных помех между каналами необходимо, чтобы их полосы отстояли друг от друга на 25 МГц. Таким образом, остается всего 3 непересекающихся канала на полосе 20 МГц: 1, 6 и 11 каналы.

Беспроводные ТД, работающие в полосе частот 2,4 ГГц, в пределах одной покрываемой зоны обслуживания должны избегать перекрытия каналов для обеспечения качества беспроводной сети (рисунок 2.4).

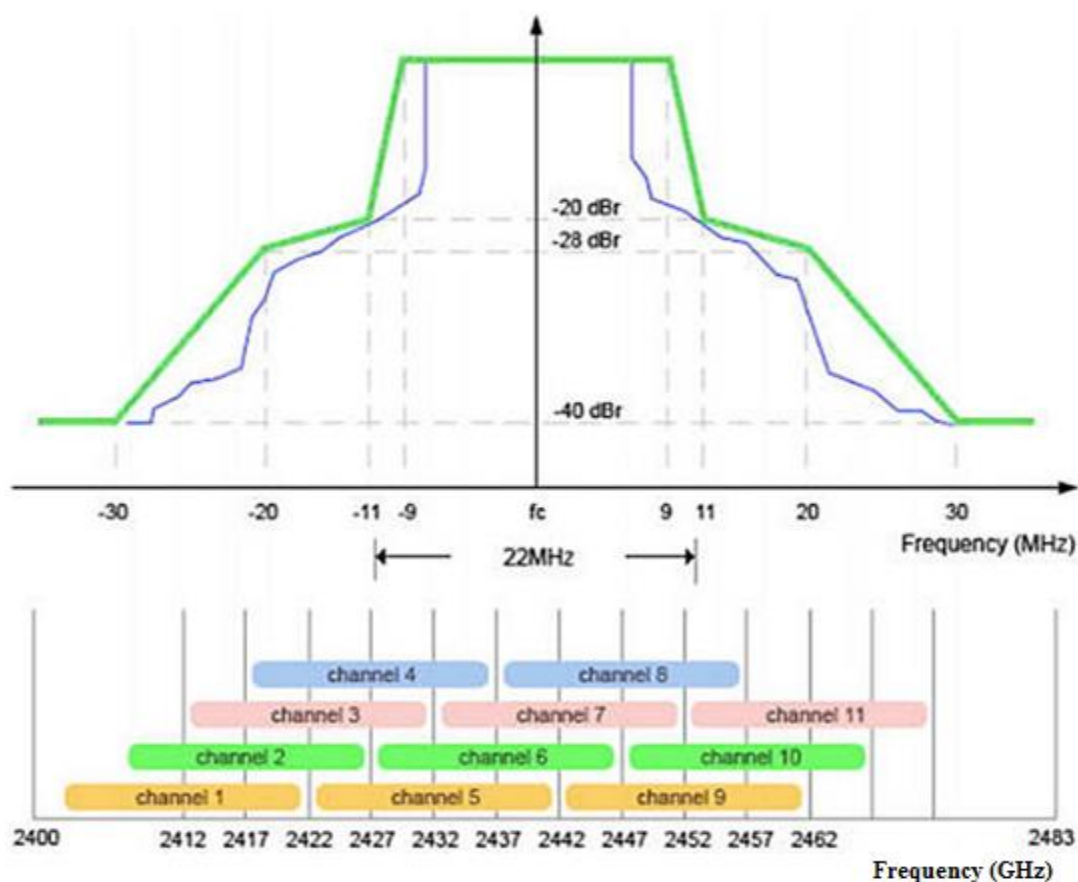


Рисунок 2.4 – Полоса частот 2,4 ГГц

Одним из главных факторов является вопрос совместимости беспроводных устройств стандарта 802.11n с устройствами 802.11a/b/g.

Большинство беспроводных локальных сетей 802.11n используют каналы 40 МГц только в диапазоне частот 5 ГГц. В сетях, которые используют полосу частот 5 ГГц (802.11n), проблемы пересекающихся каналов не бывает.

Устройства стандарта 802.11n могут использовать ширину канала 20 МГц или 40 МГц в любом частотном диапазоне (2,4 ГГц или 5 ГГц). При использовании ширины канала 40 МГц (устройства стандарта 802.11n) происходит двойное увеличение пропускной способности по сравнению с шириной канала 20 МГц (устройства стандарта 802.11b/g) [21].

В полосе частот 5 ГГц доступно 19 непересекающихся каналов, которые применяются в устройствах стандарта 802.11n, обеспечивающих максимально возможную скорость передачи данных. Сигналы распределяются без взаимного перекрытия каналов с шириной полосы 40 МГц.

Однако, при использовании полосы 40 МГц устройствами стандарта 802.11n, их работе могут мешать существующие 802.11b/g ТД, что приведет к снижению производительности всего сегмента сети [21].

### **2.3.4 Режимы работы 802.11n**

Есть три режима работы 802.11n:

- HT - High Throughput;
- Non-HT;
- HT Mixed.

Подробнее рассмотрим каждый из них.

*Режим с высокой пропускной способностью High Throughput.*

Точки доступа (ТД) 802.11n используют режим High Throughput, известный также как "чистый" режим (Greenfield-режим), предполагающий отсутствие в зоне покрытия работающих устройств стандарта 802.11b/g, которые используют эту же полосу частот. Если же такие устройства все же находятся в зоне покрытия, то они не смогут общаться с ТД 802.11n. Следовательно, в этом режиме разрешены к использованию только клиенты 802.11n, что позволит воспользоваться преимуществами повышенной скорости и увеличенной дальностью передачи данных, обеспечиваемыми стандартом 802.11n [21].

*Режим с невысокой пропускной способностью Non-HT.*

Точка доступа (ТД) 802.11n с применением режима Non-HT (известный также под названием "наследуемый" режим), отправляет все кадры в формате 802.11b/g, чтобы устаревшие станции смогли понять их. В данном режиме ТД должна использовать ширину каналов 20 МГц и при этом не будет применять преимущества стандарта 802.11n. Для обеспечения обратной совместимости все устройства должны поддерживать данный режим. Нужно учитывать, что ТД 802.11n с использованием режима Non-HT не будет обеспечивать высокую производительность. При использовании данного режима передача данных

осуществляется даже со скоростью, поддерживаемой самым медленным устройством [21].

*Смешанный режим с высокой пропускной способностью HT Mixed.*

Смешанный режим HT Mixed - наиболее распространенный режим для точек доступа (ТД) 802.11n. В данном режиме, усовершенствования стандарта 802.11n могут быть применены одновременно с существующими станциями 802.11b/g. Режим HT Mixed обеспечит обратную совместимость устройств, но устройства стандарта 802.11n получают уменьшение пропускной способности. Также в данном режиме ТД 802.11n распознает наличие старых пользователей и будет использовать более низкую скорость передачи данных, пока старое устройство осуществляет прием-передачу данных (ППД).

Таким образом, при практическом применении усовершенствований стандарта 802.11n, преимущества могут быть достигнуты в полной мере только при условии, что пользователи стандарта 802.11b/g отсутствуют и беспроводная сеть работает в "чистом" режиме High Throughput [21].

### **2.3.5 Индекс модуляции и схемы кодирования (MCS)**

Точкам доступа (ТД) и станциям 802.11n нужно вести согласование пространственных потоков (Spatial Streams) и ширины канала. В зависимости от числа антенн возникают несколько пространственных потоков. Полную теоретически возможную пропускную способность стандарта 802.11n в 600 Мбит/с можно достичь лишь при применении 4-х передающих и 4-х приемных антенн (конфигурация "4×4").

Стандарт 802.11n определяет индекс модуляции и схемы кодирования MCS (Modulation and Coding Scheme).

*MCS* – простое целое число, присваиваемое каждому варианту модуляции (всего возможно 77 вариантов). Каждый из вариантов определяет тип модуляции радиочастоты (Type), скорость кодирования (Coding Rate), защитный интервал (Short Guard Interval) и значения скорости передачи данных. Сочетание всех данных факторов устанавливает реальную физическую (PHY) скорость передачи данных, начиная от 6,5 Мбит/с до 600 Мбит/с (эта скорость может быть достигнута за счет использования всех возможных опций стандарта 802.11n).

Некоторые значения индекса MCS определены и показаны в таблице 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Значения индекса модуляции – MSC

MCS Index	Type	Coding Rate	Spatial Streams	Data Rate (Mbps) with 20 MHz CH		Data Rate (Mbps) with 40 MHz CH	
				800 ns	400 ns (SGI)	800 ns	400 ns (SGI)
0	BPSK	1 / 2	1	6.50	7.20	13.50	15.00
1	QPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3 / 4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16-QAM	1 / 2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16-QAM	3 / 4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64-QAM	2 / 3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64-QAM	3 / 4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64-QAM	5 / 6	1	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1 / 2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3 / 4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16-QAM	1 / 2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16-QAM	3 / 4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64-QAM	2 / 3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64-QAM	3 / 4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64-QAM	5 / 6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1 / 2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...	...	...	...	...	...	...	...
31	64-QAM	5 / 6	4	260.00	288.90	540.00	600.00

Таблица 2.2 – Значения индекса модуляции – MSC

Значения индекса модуляции	Тип модуляции радиочастоты	Скорость кодирования	Количество пространственных потоков	Скорость передачи данных (Мбит/с) Ширина канала 20МГц		Скорость передачи данных (Мбит/с) Ширина канала 40 МГц	
				800 нс	400 нс (ЗИ)	800 нс	400 нс (ЗИ)
				0	BPSK	1 / 2	1
1	QPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3 / 4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16-QAM	1 / 2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16-QAM	3 / 4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64-QAM	2 / 3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64-QAM	3 / 4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64-QAM	5 / 6	1	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1 / 2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3 / 4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16-QAM	1 / 2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16-QAM	3 / 4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64-QAM	2 / 3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64-QAM	3 / 4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64-QAM	5 / 6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1 / 2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...	...	...	...	...	...	...	...
31	64-QAM	5 / 6	4	260.00	288.90	540.00	600.00



Тип модуляции и скорость кодирования определяют, как данные будут передаваться в радиоэфир.

К примеру, модуляция BPSK (Binary Phase Shift Keying) была включена в первоначальный стандарт 802.11, в то время как модуляция QAM (Quadrature Amplitude Modulation) была добавлена в 802.11a. Новые методы модуляции и кодирования, как правило, более эффективные и поддерживают более высокие скорости передачи данных, но устаревшие методы и скорости все еще поддерживаются для обратной совместимости [21].

Для достижения максимальной скорости соединения 300 Мбит/с необходимо, чтобы и точка доступа (ТД), и беспроводной адаптер поддерживали два пространственных потока (Spatial Streams) и удвоенную ширину канала 40 МГц.

Исходя из полученной скорости соединения по приведенной таблице 2.1, можно достоверно определить сколько потоков и какая ширина канала были задействованы. Так скорости соединения 65 или 130 Мбит/с говорят о том, что одно из устройств: ТД или адаптер используют одинарную ширину канала 20 МГц.

Приведем расшифровку значений некоторых параметров.

Короткий защитный интервал SGI (Short Guard Interval) – вычисляет интервал времени между передаваемыми символами (наименьшая единица данных, передаваемых за один раз). Данный интервал помогает при приеме данных избежать задержки из-за межсимвольных помех Inter-Symbol Interference (ISI) и преодолеть эхо (отражение звуковых волн).

В устройствах стандарта 802.11b/g имеется защитный интервал 800 нс, а в устройствах 802.11n есть возможность использования паузы всего в 400 нс. Более короткие интервалы привели бы к большему вмешательству и снижению пропускной способности, в то время как длительные интервалы могут привести к нежелательным простоям в беспроводной среде. Короткий защитный интервал (SGI) повышает скорость передачи данных на 11%.

MCS значения от 0 до 31 определяют тип модуляции и схемы кодирования, которые будут применяться для всех потоков. MCS значения с 32 по 77 описывают смешанные комбинации, которые могут быть использованы для модуляций от 2 до 4 пространственных потоков.

Точки доступа (ТД) стандарта 802.11n должны поддерживать MCS значения от 0 до 15, в то время как устройства стандарта 802.11n должны поддерживать MCS значения от 0 до 7. Все другие значения MCS, в том числе связанные с каналами шириной 40 МГц, коротким защитным интервалом (SGI), относятся к опциональным. Определение значения MCS и SGI для всех ваших устройств 802.11n, является прекрасным способом для определения набора скоростей передачи данных, которые могут быть использованы вашей беспроводной сетью [21].

### 2.3.6 Сравнение стандартов IEEE 802.11

В таблице 2.3 показано сравнение стандартов IEEE 802.11.

Таблица 2.3 – Сравнение стандартов IEEE 802.11 [11]

Параметры / Стандарты	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n	
Дата сертификации	1999	2001	1999	2008-2009	
Частоты	2,4 ГГц	2,4 ГГц	5 ГГц	2,4 ГГц	5 ГГц
Количество неперекрывающихся каналов	3	3	12	3	12
Скорость на канал	11 Мбит/с	54 Мбит/с	54 Мбит/с	65 Мбит/с	65 Мбит/с
Каналов в пространстве	1	1	1	2,3,4*	2,3,4*
Объединение каналов	нет	нет	нет	нет	Да
Максимальная скорость	11 Мбит/с	54 Мбит/с	54 Мбит/с	130 Мбит/с	270 Мбит/с
Примечание - *не совместимы с Wi-Fi					

## 3 Безопасность беспроводных сетей

Важность обеспечения безопасности любой информационной системы, любой сети является первостепенной задачей. Так как в настоящее время правильно спроектированная и настроенная беспроводная сеть не уступает по взломостойкости любой проводной сети.

Защищенность информации, передаваемой по радиоканалу, изначально вызывала много вопросов и сомнений. И действительно, информация, излученная в эфир, может быть легко подслушана. Поэтому все разработчики стандартов и производители оборудования уделяют большое внимание вопросам информационной безопасности [11].

### 3.1 Механизмы обеспечения безопасности сетей стандарта 802.11

При активизации беспроводный абонент начинает поиск точек радиодоступа в своей зоне радиовидимости с помощью управляющих пакетов Probe Request. Кадр Probe Request посылаются в каждый из радиоканалов в поиске всех доступных точек доступа (ТД) с необходимыми клиенту идентификатором SSID и поддерживаемыми скоростями. Каждая ТД из находящихся в зоне радиовидимости абонента, удовлетворяющая запрашиваемым во фрейме Probe Request параметрам, отвечает фреймом Probe Response, содержащим синхронизирующую информацию и данные о текущей загрузке точки радиодоступа. Пользователь определяет, с какой точкой радиодоступа он будет работать, путем сопоставления

поддерживаемых ими скоростей радиообмена и загрузки. После того как предпочтительная точка радиодоступа выбрана, пользователь переходит в фазу аутентификации [23].

### **3.1.1 Открытая аутентификация**

В действительности, открытая аутентификация - это отсутствие какой-либо проверки подключаемого абонента. На первый взгляд использование данного алгоритма может показаться бессмысленным, однако следует учитывать, что разработанные в 1997 году методы аутентификации IEEE 802.11 ориентированы на быстрое логическое подключение к беспроводной локальной сети. Кроме того, многие IEEE 802.11 - совместимые устройства представляют собой портативные блоки сбора информации (сканеры штрих-кодов и т. п.), которые не имеют достаточной процессорной мощности, необходимой для реализации сложных алгоритмов аутентификации.

Если в беспроводной сети шифрование не используется, любой абонент, знающий идентификатор SSID точки радиодоступа, получит доступ к сети. При использовании точками радиодоступа шифрования WEP, сами ключи шифрования становятся средством контроля доступа. Если пользователь не располагает корректным WEP-ключом, то он все равно авторизуется на точке доступа (ТД), но не сможет ни передавать, ни расшифровывать данные, переданные точкой доступа (ТД) [11].

### **3.1.2 Аутентификация с общим ключом**

В отличие от открытой аутентификации, аутентификация с совместно используемым ключом не позволяет абоненту ассоциироваться на точке доступа (ТД) при несовпадении WEP-кодов. Процесс аутентификации проходит в несколько последовательных этапов:

1. Пользователь посылает точке радиодоступа запрос аутентификации, при этом указывая на необходимость использования режима аутентификации с общим ключом.

2. Точка радиодоступа посылает подтверждение аутентификации, которое содержит Challenge Text.

3. Абонент шифрует Challenge Text своим статическим WEP-ключом и посылает точке радиодоступа запрос аутентификации.

4. Если точка радиодоступа в состоянии успешно расшифровать запрос аутентификации и содержащийся в нем Challenge Text, она посылает абоненту подтверждение аутентификации, таким образом предоставляя доступ к сети.

### **3.1.3 Аутентификация по MAC-адресу**

Аутентификация абонента по его MAC-адресу не предусмотрена стандартом IEEE 802.11, однако поддерживается многими производителями оборудования для беспроводных сетей.

При аутентификации по MAC-адресу происходит сравнение MAC-адреса пользователя либо с хранящимся локально на точке доступа (ТД)

списком разрешенных адресов клиентов, либо с помощью внешнего сервера аутентификации.

Аутентификация по MAC-адресу применяется в дополнение к открытой аутентификации и аутентификации с общим ключом стандарта IEEE 802.11 для уменьшения вероятности доступа посторонних абонентов [11].

### **3.2 Механизм шифрования WEP**

Шифрование WEP (Wired Equivalent Privacy - секретность на уровне проводной связи) базируется на алгоритме RC4 (Rivest's Cipher v.4 - код Ривеста), представляющий собой симметричное потоковое шифрование. Для нормального и правильного обмена данными ключи шифрования у пользователя и точки радиодоступа должны быть идентичными.

Ядро алгоритма состоит из функции генерации ключевого потока. Данная функция генерирует последовательность битов, которая после объединяется с открытым текстом посредством суммирования по модулю 2.

Дешифрация состоит из регенерации данного ключевого потока и суммирования его с шифрограммой по модулю 2 для восстановления исходного текста. Другая основная часть алгоритма – эта функция инициализации, использующая ключ переменной длины для создания начального базового состояния генератора ключевого потока.

### **3.3 Уязвимость защиты 802.11.**

Самое неприятное в плохой или не настроенной защите беспроводной сети - это то, что администратор такой сети даже не узнает, что злоумышленник проник в сеть.

*Уязвимость открытой аутентификации.*

Открытая аутентификация не позволяет точке радиодоступа определить, является абонент легитимным или нет. Это становится заметным просветом в системе безопасности в том случае, если в беспроводной локальной сети не используется шифрование WEP. Поэтому, не рекомендуется использовать открытую аутентификацию при настройке точек доступа (ТД).

*Уязвимость аутентификации с общим ключом.*

Аутентификация с общим ключом требует настройки у клиента статического WEP-ключа для шифрования Challenge Text, отправленного точкой радиодоступа. Точка радиодоступа аутентифицирует абонента посредством дешифрации его ответа на Challenge и сравнения его с отправленным оригиналом (исходником). Обмен фреймами, содержащими Challenge Text, происходит по открытому радиоканалу, и, следовательно, подвержен атакам со стороны наблюдателя (Man in the middle Attack). Наблюдатель может принять как нешифрованный Challenge Text, так и тот же Challenge Text, но уже в зашифрованном виде.

Шифрование WEP осуществляется путем выполнения побитовой операции XOR над текстом сообщения и ключевой последовательностью. В результате такой операции получается зашифрованное сообщение (Cipher-

Text). Важно понимать, что в конечном результате выполнения побитовой операции XOR над зашифрованным сообщением и ключевой последовательностью мы будем иметь текст исходного сообщения. Таким образом, наблюдатель может легко вычислить сегмент ключевой последовательности путем анализа фреймов в процессе аутентификации абонента.

#### *Уязвимость аутентификации по MAC-адресу.*

Стандарт IEEE 802.11 требует передачи MAC-адресов абонента и точки радиодоступа в открытом виде. Это означает, что злоумышленник может, вычислив легитимные MAC-адреса, подменить свой MAC на легитимный. Подмена MAC-адреса возможна в некоторых беспроводных адаптерах. Для выявления и определения MAC-адресов легитимных абонентов злоумышленник может воспользоваться бесплатным анализатором трафика.

#### *Уязвимость шифрования WEP.*

Атаки на зашифрованные данные с помощью технологии WEP можно классифицировать на 2 метода: пассивные и активные [24].

#### *Пассивные сетевые атаки.*

В августе 2001 года криптоаналитиками Флурером С., Мантини И. и Шамиром А. (Fluhrer S., Mantin I., Shamir A.) – было установлено, что секретный ключ шифрования WEP может быть вычислен с применением определенных фреймов, пассивно собранных в беспроводной локальной сети. Причиной уязвимости послужила реализация в WEP метода планирования ключей (Key Scheduling Algorithm, KSA) алгоритма потокового шифрования RC4. Некоторые векторы инициализации (так называемые «слабые» векторы) дают возможность установить побайтовый состав секретного ключа, используя статистический анализ [24].

Исследователями из AT&T/Rice University и авторами программы AirSnort была продемонстрирована возможность определения секретного ключа длиной 40 и 104 битов после анализа всего лишь 4 миллионов фреймов. Для загруженной беспроводной локальной сети это эквивалентно приблизительно 4 часам работы, после которого ключ шифрования станет известен пассивному наблюдателю.

Подобная уязвимость делает шифрование с использованием WEP неэффективным, лишая его криптографической стойкости. Применение динамических секретных ключей шифрования WEP решает данную проблему лишь частично, для полного устранения уязвимости необходим способ усиления самого ключа.

#### *Активные сетевые атаки.*

Индуктивное вычисление секретного ключа шифрования WEP представляет собой процесс воздействия на беспроводную локальную сеть для получения и захвата определённой информации и относится к классу активных сетевых атак. При потоковом шифровании выполняется двоичное сложение по модулю 2 (XOR) исходного сообщения с ключевой

последовательностью с целью получения зашифрованного сообщения. Данный факт лёг в основу этой атаки.

Высокая эффективность атаки индуктивного вычисления ключа, которая предпринимается сторонним наблюдателем в беспроводной локальной сети стандарта IEEE 802.11, объясняется отсутствием действенных средств контроля целостности сообщений (Message Integrity Check, MIC). Принимающая сторона не в состоянии распознать факт модификации содержимого фрейма в процессе передачи по общедоступному радиоканалу.

Более того, значение ICV (Integrity Check Value), которое предусмотрено стандартом для контроля целостности сообщений, вычисляется с помощью специальной функции CRC32 (32-bit Cyclical Redundancy Check, контроль при помощи циклического 32-битного избыточного кода), подверженной атакам с манипуляцией битами. Таким образом, в отсутствие механизмов контроля целостности сообщений беспроводные локальные сети подвержены активным атакам: повторным использованием вектора инициализации (IV Replay) и манипуляции битами (Bit-Flipping) [24].

Стандартом IEEE 802.11 не предусмотрены какие-либо механизмы управления ключами шифрования. По определению, алгоритм WEP поддерживает лишь статические ключи, которые заранее распространяются тем или иным способом между абонентами и точками радиодоступа беспроводной локальной сети. Поскольку стандарт IEEE 802.11 аутентифицирует физическое устройство, а не его пользователя, утрата абонентского адаптера, точки радиодоступа или собственно секретного ключа представляют опасность для системы безопасности беспроводной локальной сети. В результате при каждом подобном инциденте администратор сети будет вынужден вручную произвести смену ключей у всех своих клиентов и в точках доступа (ТД).

Данные административные действия приемлемы для небольшой беспроводной локальной сети, но совершенно неприемлемы для сетей, в которых абоненты исчисляются сотнями и тысячами, и/или распределены территориально. В условиях отсутствия механизмов генерации и распространения ключей администратор вынужден пристально охранять абонентские адаптеры и оборудование инфраструктуры сети [24].

#### **4 Беспроводные точки доступа**

Сеть, которая создана с помощью технологии AirMax, может быть масштабирована до сотен клиентов на каждую базовую станцию (БС). Для этого применяется технология MIMO, новое поколение беспроводных точек доступа (ТД) NanoStation и базовых станций (БС) Rocket. Дополнительный модуль Bullet может быть соединен с наружной антенной, реализуя канал TCP/IP со скоростью до 100 Мбит/с.

Беспроводные точки доступа (ТД) *Nanostation M* (рисунок 4.1) не имеют аналогов. Отличаются они небольшим весом. Точка доступа (ТД) с интегрированной антенной 10 дБ весит всего лишь 400 грамм. *Nanostation M* по своему дизайну очень компактны, просты и удобны в настройке. На задней панели находятся индикаторы, благодаря которым можно настроить беспроводную ТД так, чтобы уровень приема сигнала был максимальным [25].

*Ubiquiti NanoStation M5* может являться как абонентом, так и базовой станцией. Она отлично подойдет для передачи аудио и видео сигналов на большие расстояния.

*Nanostation M* применяет технологию питания PoE (Power over Ethernet). Благодаря которой, отпадает необходимость в прокладке дополнительных кабелей. И питание, и передача данных осуществляются посредством одного кабеля – витой пары. Беспроводные точки доступа (ТД) *Nanostation M* можно установить в любых местах: на окно, на крышу здания, на стену, на любую вертикальную поверхность.

После установки устройства на определенном месте достаточно просто включить необходимый режим работы – клиент, точка доступа, клиент или точка доступа в режиме WDS. После чего устройство полностью готово к работе. Нет необходимости в подключении дополнительных антенн или кабелей, а также помещать беспроводную точку доступа (ТД) в термобокс, так как все это уже включено в *Nanostation*. Для своих пользователей *Nanostation M* предлагает множество функций, предназначенных для оптимальной настройки оборудования.

Беспроводная ТД *Nanostation M5* с биполярной двойной антенной 16 дБ рассчитана для диапазона 5 ГГц. Выходная мощность плавно регулируется до 27 дБм (500 мВт). ТД *Nanostation M2* рассчитана для диапазона 2,4 ГГц и оснащена биполярной двойной антенной 11 дБ. Выходная мощность которой регулируется до 28 дБм (630 мВт).



Рисунок 4.1 – NanoStation M5 - Беспроводная точка доступа

NanoStation M5 — всепогодная Wi-Fi/MIMO ТД производства фирмы UBNT. Выполнена во влагозащищенном, морозостойком корпусе (IP54), поддерживает стандарт 802.11a/n и фирменный протокол AirMax [25].

NanoStation M5 является вторым поколением точек доступа (ТД) Nanostation от фирмы UBNT и работает в WiFi-диапазоне 5 ГГц. Устройство оснащено двухполяризационной антенной MIMO 2×2 усилением 16 дБ, которая имеет широкую диаграмму направленности в обеих плоскостях [26].

Беспроводные точки доступа (ТД) с интегрированными антеннами Nanostation M от фирмы UBNT удобны тем, что для их работы не нужны коаксиальные кабели, которые могут являться причиной существенных потерь сигнала. В тех случаях, когда необходимо использовать антенну с большим усилением, чем у встроенной антенны Nanostation M (более 20-30 дБ), можно использовать специально созданные для этих целей устройства Bullet M2 HP или Bullet M5 HP [25].

Bullet – компактное устройство, которое весит всего 180 грамм, и обладает функциональностью NanoStation. Bullet M5 HP крепится прямо к антенному разъему N-типа, и благодаря своему прямому соединению с антенной не оказывает дополнительных потерь сигнала, вызываемых коаксиальными кабелями. Bullet M5 HP оснащен процессором 400 МГц и оперативной памятью 32 Мбайта [5,26].

Специально для наружных PtP мостов и PTMP БС разработаны беспроводные внешние ТД Rocket M5. Устройство обладает высокой выходной мощностью и благодаря функции MIMO 2×2 достигает значительной производительности при скорости 150 Мбит/с на расстояниях более 50 км.

Первая в мире интегрированная в антенну беспроводная точка доступа (ТД) AirGrid M применяет технологию InnerFeed, являющейся революционной для широкополосных наружных беспроводных устройств. Полная интеграция радиосистемы с антенной обеспечивает высокое соотношение цены и производительности. Устройство обладает самой простой и надежной конструкцией.

Применение технологии AirMax дает возможность масштабировать высокопроизводительные сети PtMP, а приложение AirControl позволяет операторам централизованно управлять более чем сотней устройств.

#### **4.1 Технические характеристики Ubiquiti NanoStation M5**

Ubiquiti NanoStation M5 - высокоскоростная точка доступа (ТД) с поддержкой нового стандарта 802.11n, обеспечивает скорость соединения до 150 Мбит/с TCP/IP трафиком до 100 Мбит/с.

Основные отличия заключаются в применении абсолютно новой технологии AirMax и использовании антенн MIMO 2×2, что позволяет передавать большее количество данных, а также расширенный технический функционал.



ТД UBNT NanoStation M5 предназначена для соединения удалённых объектов Wi-Fi мостом. Главной отличительной чертой таких мостов, построенных на основе ТД UBNT NanoStation M5, является надёжность в любых климатических условиях. Это одно из самых популярных решений для линков на короткие дистанции до 5 км со скоростью до 300 Мбит/с.

Радиус действия ТД UBNT Nanostation M5 варьируется в диапазоне нескольких километров и зависит от высоты установки, зашумленности эфира, удаленности и мощности принимающей стороны (таблица 4.1) [10].

Таблица 4.1 – Радиус действия NanoStation M5 от UBNT

Параметры	город, в километрах	открытая местность, в километрах
Стандарт	1 .. 2	2 - 5
Внешняя антенна	до 5	3 - 10
Внешняя антенна + усилитель	9 - 15	12 - 45

Небольшая внешняя точка доступа (ТД), работающая как по технологии 2×2 MIMO PtMP (точка - много точек), так и 2×2 MIMO PtP (точка - точка). Использование этой ТД оптимально в районах, где диапазон 5 ГГц сильно зашумлен. AirMax технология позволяет достичь реальной пропускной способности 150 Мбит/сек при максимальной дальности линка до 7 километров (км).

ТД NanoStation M5 от UBNT имеют новый усовершенствованный дизайн. Встроена MIMO антенна с усилением 16 дБ и двойной поляризацией. Дополнительный порт Ethernet служит для подключения IP камеры с питанием PoE. Надёжный корпус позволяет использовать ТД при любых климатических условиях без применения специального термобокса.

Технические характеристики беспроводной ТД NanoStation M5 приведены в таблице 4.2.

Спецификации передатчика и приемника NanoStation M5 приведены в таблице 4.4, а в таблице 4.5 указаны физические и климатические параметры точки доступа.

Таблица 4.2 – Технические характеристики NanoStation M5 от UBNT

Процессор	Atheros MIPS 24КC, 400 МГц
Оперативная память	32 Мбайта SDRAM, 8 Мбайтов Flash
Сетевой интерфейс	2×10/100 BASE-TX Ethernet (RJ-45)
Ширина канала	5/10/20/40 МГц
Рабочий диапазон:	4900-5900 МГц (802.11a/n)
Зона покрытия	Более 15 км при внешнем размещении (в зависимости от антенны базовой станции)
Программное обеспечение	AirOS v5

Параметры антенны NanoStation M5 указаны в таблице 4.3, а на рисунке 4.2 показаны диаграммы направленности антенн.

Таблица 4.3 – Параметры антенны NanoStation M5 от UBNT

Параметр	Значение
Конструкция	Встроенная, 2×2 MIMO с двойной поляризацией, усиление 14,6~16,1 дБ
Поляризация	Двойная линейная
Максимальный КСВ	1,6:1

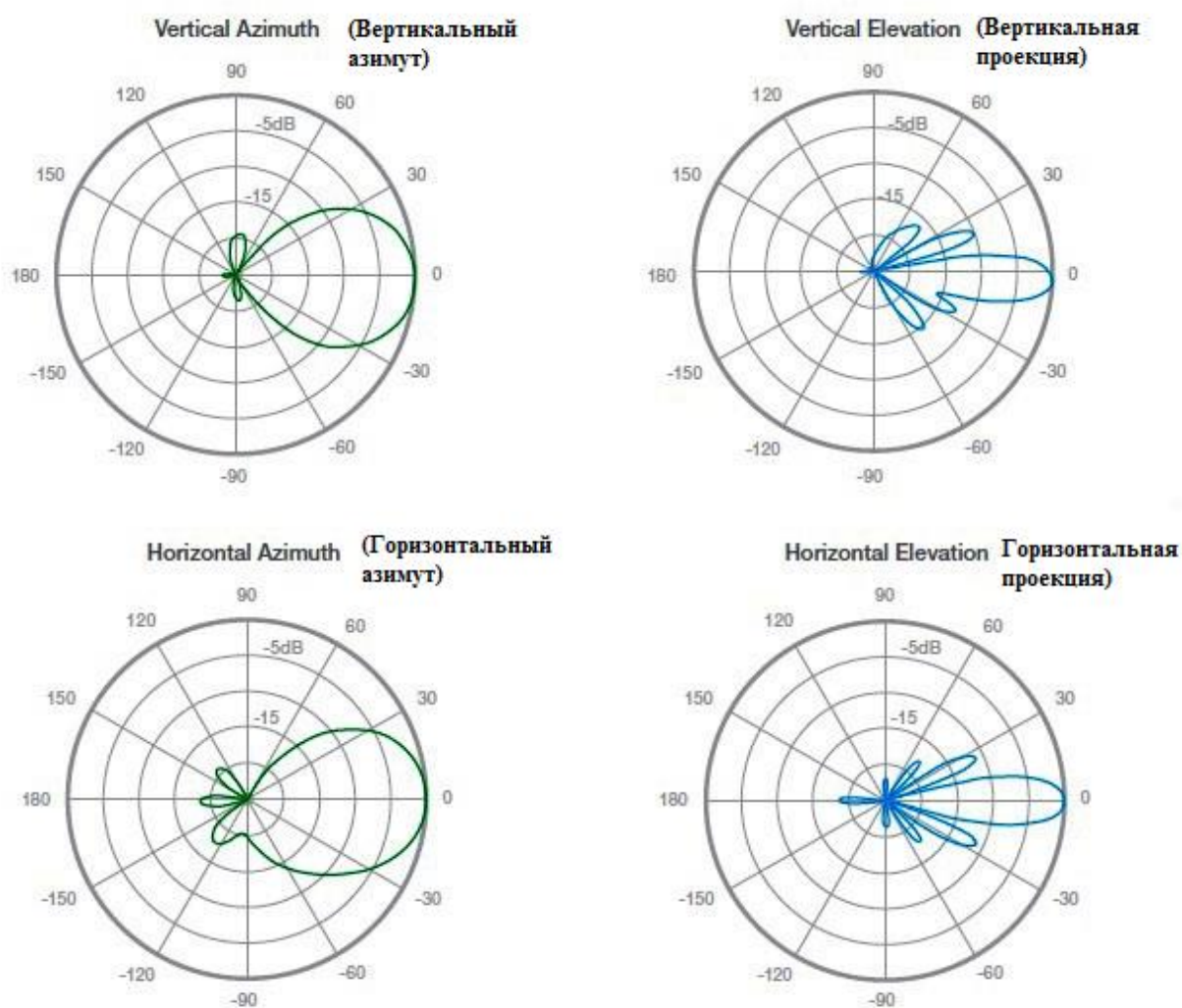


Рисунок 4.2 – Диаграммы направленности антенн NanoStation M5 от UBNT

Таблица 4.4 – Спецификация передатчика / приемника NanoStation M5 Ubiquiti Networks (UBNT)

Стандарт	Скорость передачи	Мощность передатчика	Чувствительность	Погрешность
802.11a	6-24 Мбит/с	27 дБм	-94 дБм (мин.)	+/- 2 дБ
	36 Мбит/с	25 дБм	-80 дБм	+/- 2 дБ
	48 Мбит/с	23 дБм	-77 дБм	+/- 2 дБ
	54 Мбит/с	22 дБм	-75 дБм	+/- 2 дБ
802.11n	MCS0	27 дБм	-96 дБм	+/- 2 дБ
	MCS1	27 дБм	-95 дБм	+/- 2 дБ
	MCS2	27 дБм	-92 дБм	+/- 2 дБ
	MCS3	27 дБм	-90 дБм	+/- 2 дБ
	MCS4	26 дБм	-86 дБм	+/- 2 дБ
	MCS5	24 дБм	-83 дБм	+/- 2 дБ
	MCS6	22 дБм	-77 дБм	+/- 2 дБ
	MCS7	21 дБм	-74 дБм	+/- 2 дБ
	MCS8	27 дБм	-95 дБм	+/- 2 дБ
	MCS9	27 дБм	-93 дБм	+/- 2 дБ
	MCS10	27 дБм	-90 дБм	+/- 2 дБ
	MCS11	27 дБм	-87 дБм	+/- 2 дБ
	MCS12	26 дБм	-84 дБм	+/- 2 дБ
	MCS13	24 дБм	-79 дБм	+/- 2 дБ
	MCS14	22 дБм	-78 дБм	+/- 2 дБ
MCS15	21 дБм	-75 дБм	+/- 2 дБ	

Таблица 4.5 – Физические и климатические параметры NanoStation M5

Процессор	Atheros MIPS 24КC, 400 МГц
Оперативная память	32 МБ SDRAM, 8МБ Flash
Сетевой интерфейс	2×10/100 BASE-TX (кат.5, RJ-45), Ethernet интерфейс
Сертификат соответствия	FCC 15.247, IC, CE
Ширина канала	5/10/20/40 МГц
Рабочий диапазон	4900-5900 МГц (802.11a/n)
Мощность передатчика	23 дБм, + /-2 дБ
RX Чувствительность	-90 дБм + /-2 дБ
Антенна	14,6~16,1 дБ двойная поляризация
Зона покрытия	До 6 км (при минимальной ширине канала)
TCP / IP Пропускная	до 150 Мбит / с +
Максимальная потребляемая мощность	8 Вт
Блок питания	24 В; 0,5 А (12 Вт). Поставляется с инжектором
Способ питания	PoE. Напряжение подается через Ethernet (пара 4 и 5 - положительная, 7 и 8 - отрицательная)
Испытания на вибрации	ETSI300-019-1.4
Влажность	от 5 до 95% (с конденсацией)
Рабочая температура	от -30 до + 80°С
Размеры	29,4 см × 8 см × 3 см
Вес	0,4 кг
Материал корпуса	Устойчивый к УФ лучам пластик для наружного применения

## 5 Экспериментальная часть

### 5.1 AirView — анализатор частотного диапазона

Чтобы оптимизировать производительность беспроводной сети, следует определить лучшее соотношение сигнала и помех. Уровень сигнала можно предсказать и запланировать, основываясь на мощности передачи, усилении антенны, расстоянии и частоте. Однако, с частотами 2,4 ГГц и 5 ГГц бывают проблемы, помехи в них нельзя предсказать, и не гарантирован чистый спектр на этих частотах. Для проведения такого определения требуется анализатор спектра.

После установки ТД, может возникнуть следующая проблема: ТД не работает на скорости, заявленной в технических характеристиках.

Причиной падения скорости может быть то, что другие радиоустройства вносят помехи в работу точки доступа. Чтобы избежать этого, необходимо было найти частоты, на которых другие устройства создают наименьшие помехи и настроить точку доступа на этот канал.

Анализ частотного диапазона Wi-Fi можно провести с помощью специального анализатора спектра *Ubiquiti AirView*.

*AirView* – анализатор спектра фирмы Ubiquiti Networks.

*AirView* — анализатор частотного диапазона.

Анализатор спектра Ubiquiti AirView - предназначен для эффективного использования радиодиапазона 5 ГГц. Программное обеспечение Ubiquiti AirView отображает графическую информацию о заполнении радиоканалов, распределении по частотам энергии, а также динамических энергетических характеристиках частотного спектра 5 ГГц.

Для проведения эксперимента использовали точку доступа (ТД) Ubiquiti NanoStation M5 с встроенным анализатором спектра.

Для запуска программы: открываем браузер и вводим IP-адрес точки доступа. По умолчанию адрес точки доступа 192.168.1.20.

Переходим в настройки точки доступа и выбираем Tools → AirView (рисунок 5.1).

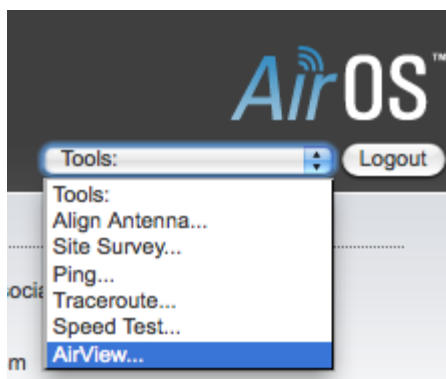


Рисунок 5.1 – Окно программы Ubiquiti AirView

На экране появится предупреждение о том, что все беспроводные соединения будут остановлены. Все клиенты на время проведения спектрального анализа частот будут отключены от точки доступа (ТД).

Ставим «галочку» напротив *Do NOT warn me about this in the future*, чтобы предупреждение больше не появлялось, и нажимаем на Launch AirView (рисунок 5.2).

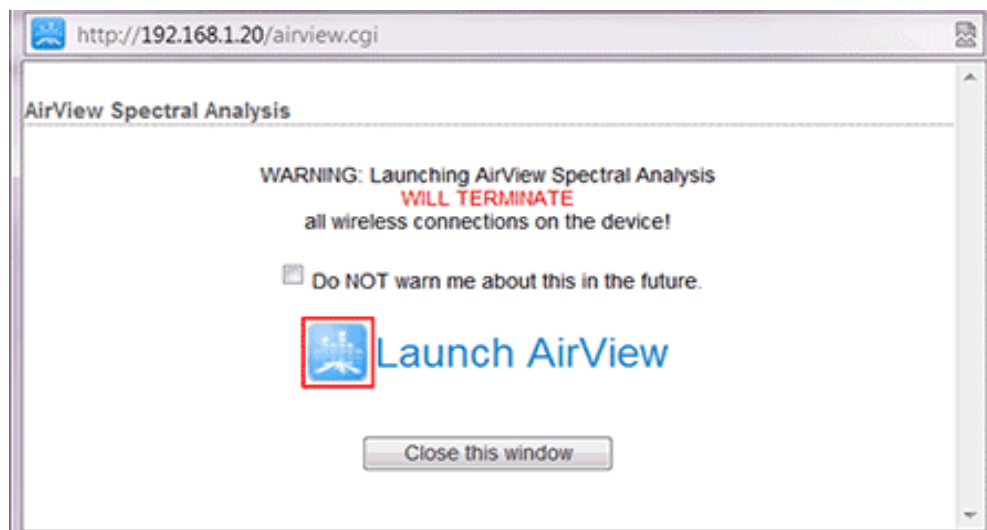


Рисунок 5.2 – Окно программы Ubiquiti AirView

Нажимаем синюю кнопку *AirView should be starting now*. Появится окно утилиты AirView с графиками (рисунок 5.3).

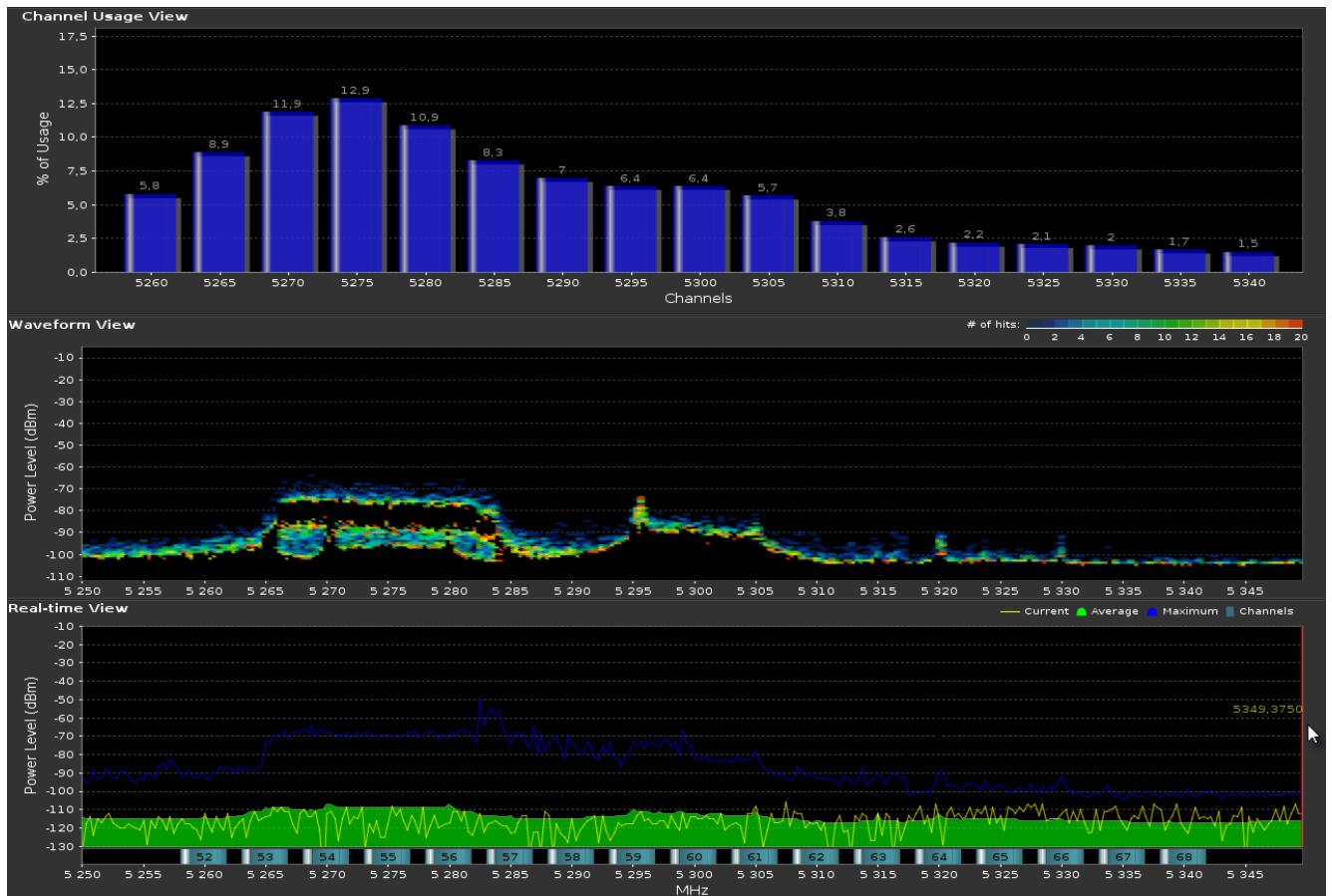


Рисунок 5.3 – Окно программы Ubiquiti AirView

## 5.2 Описание работы спектрального анализатора AirView Ubiquiti Networks (UBNT)

### 5.2.1 Обзор графиков AirView

*Диаграмма использования канала.*

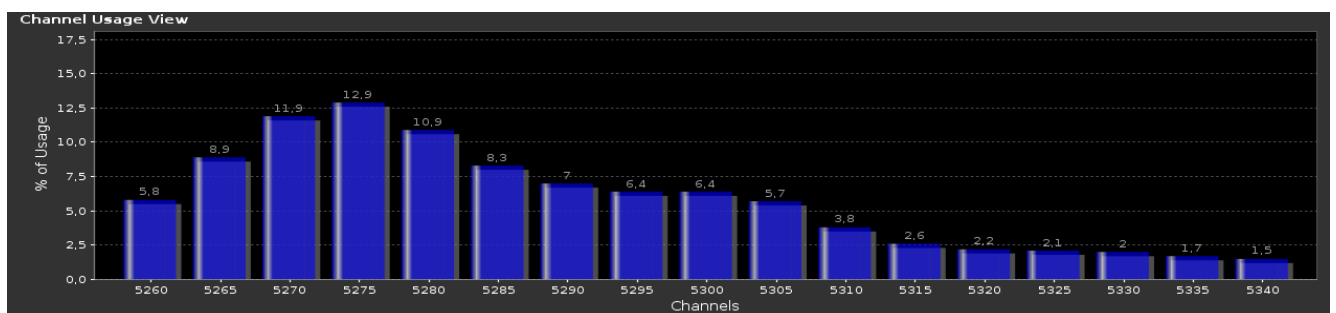


Рисунок 5.4 – Диаграмма использования канала

Диаграмма использования канала (рисунок 5.4) - это основной график для определения самого лучшего канала при развертывании беспроводной сети с оптимальными эксплуатационными качествами. На графике, каждый

беспроводной канал диапазона 5250-5345 МГц представлен столбцом, где отображается процентное соотношение «переполненности» конкретного канала. Это процентное соотношение вычислено исходя из анализа как популярности так и мощности радиочастотной энергии на этом канале с начала сеанса. Анализ данной диаграммы при развертывании беспроводной сети позволяет избежать загруженных каналов [27].

### *График Waveform View.*

Waveform View — этот график показывает уровень мощности на каждой частоте за все время работы анализатора (рисунок 5.5).

По высоким вершинам на графике можно определить, что на данной частоте работает какое-то другое радиоустройство.

Waveform View - это основанный на времени график, который показывает энергию, собранную для каждой частоты, когда работает программа AirView. Цвет показывает амплитуду: холодные цвета отображают низкие уровни энергии, теплые — высокие. Спектральный вид определяет изменение энергии в данных условиях.

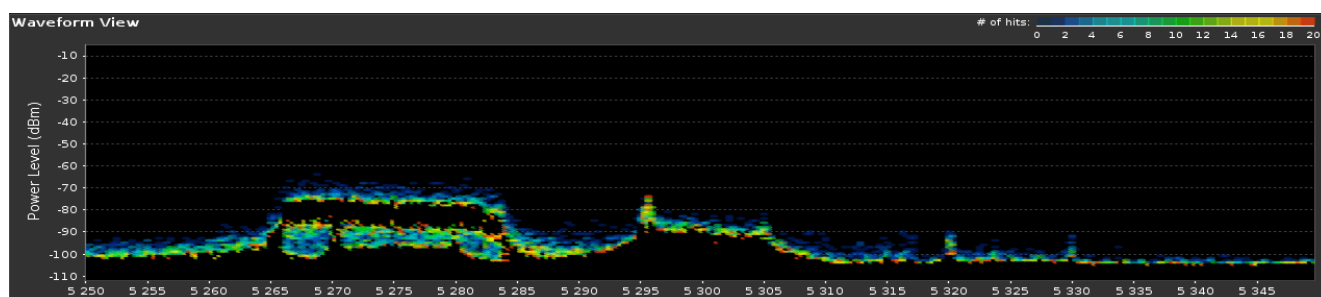


Рисунок 5.5 – График Waveform View

Данный график показывает суммарную энергию, накопленную с начала сеанса работы программы AirView. Мощность энергии в дБ показана в диапазоне частот. Синий цвет принадлежит силе и частоте энергии, которые появляются в эфире относительно редко, тогда как яркие цвета (зеленый, желтый, оранжевый, красный) указывают на силу и частоту энергии, встречающиеся гораздо чаще. Вид спектра во времени демонстрирует статический рисунок формы радиочастотной энергии в данной среде.

Длительный анализ спектра помогает определить постоянные источники радиосигнала в данной среде.

Динамический график совокупной энергии имеет цветовую расшифровку. Спектр определяется от темно-синего (чистый канал) до красного ("зашумленный" канал)

Спектральный вид с течением времени показывает статус возникновения и пропадания сигналов в данной среде.



Этот график следует использовать в целях оптимизации сетевой установки, избегая высокой загруженности используемых каналов и создания новой точки доступа (ТД) в относительно малозагруженных частях диапазона.

Также этот график следует применять в целях оптимизации настроек беспроводной сети, избегая каналов с высоким уровнем помех.

#### *График Real-time View.*

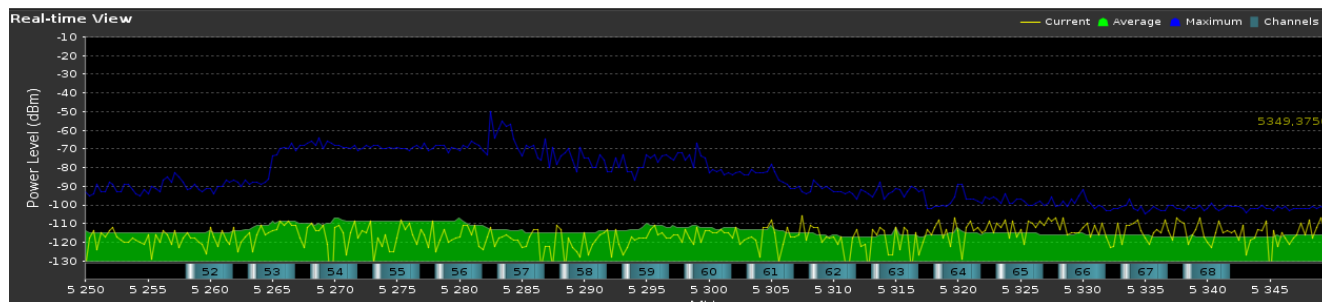


Рисунок 5.6 – Спектроанализатор реального времени

График Real-time (диаграмма в реальном времени) – этот график отображает уровень энергии в текущий момент времени в зависимости от частоты. График в реальном времени (Real-time) — показывает энергию в реальном времени, как функцию от частоты (рисунок 5.6).

Традиционный график анализа спектра имеет три цветовые линии: желтую, синюю и зеленую.

*Желтая линия (Current) на графике* — это текущая мощность. Current (реальное время) - этот параметр показывает энергию в реальном времени, замеченную устройством AirView как производную частоты.

*Синяя линия (Max Hold)* — это максимальная мощность с начала анализа. Максимальная задержка - этот показатель обновляется и фиксирует максимальный уровень мощности на частоте с самого начала работы AirView.

Среднее значение мощности отображается на графике *зеленым заполнением (Average)*. Average - этот показатель отображает текущую среднюю энергию сигнала на частоте [28].

#### *График Waterfall View.*

Waterfall View - это график который показывает энергию, собранную для каждой частоты, когда работает AirView в данный момент времени (рисунок 5.7). Цвет показывает амплитуду: холодные цвета (синий) отображают более низкие уровни энергии, теплые (желтый, оранжевый, красный) — высокие.

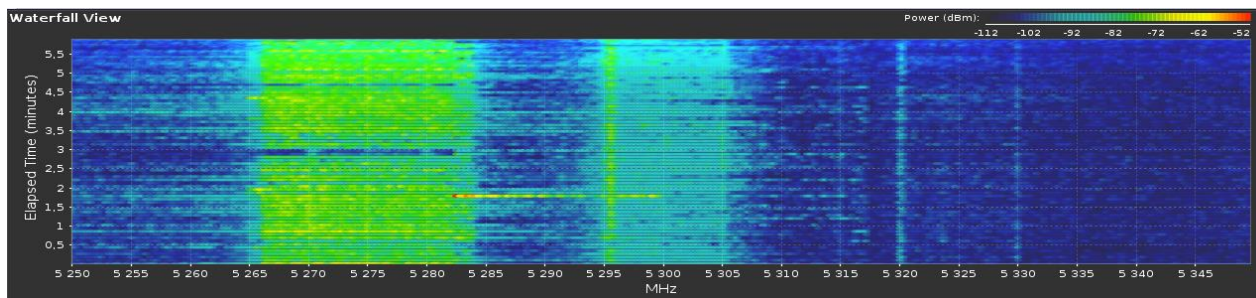


Рисунок 5.7 – График Waterfall View

Цветовая шкала в правом верхнем углу указывает на соответствие числовых значений различным цветам уровней энергий (дБ). Т.е. с помощью цветовой шкалы в правом верхнем углу, можно по цвету определить численное значение энергии в децибелах (дБ) [27-28].

### 5.3 Исследование работы беспроводной сети передачи данных в условиях загруженного радиоэфира на частоте 5 ГГц в городе Алматы

В городе Алматы работает беспроводная корпоративная сеть, построенная по технологии AirMax. Сеть предоставляет клиентам высокоскоростной интернет, скорость не менее 10 Мбит/с.

При оказании услуг предоставления высокоскоростного интернета по технологии AirMax, у клиента устанавливается точка доступа с заявленной скоростью. После установки точки доступа (ТД), может возникнуть следующая проблема: точка доступа не работает на скорости, заявленной в технических характеристиках, т.к. причиной падения скорости может быть то, что другие радиоустройства, работающие на тех же частотных диапазонах создают помехи работе точки доступа.

Чтобы избежать этого, необходимо было найти частоты, на которых другие устройства создают наименьшие помехи и настроить точку доступа на этот канал. В настоящий момент для устранения этой проблемы операторы производят переключение на другой свободный канал скорее интуитивно, без четкого представления будет на данном канале стабильной скоростью или нет.

Также необходимо определить, при какой минимальной мощности соседних радиостанций, излучения которых являются шумом для радиостанции AirMax, будет обеспечена скорость 10 Мбит/с, т.е. произвести оптимизацию работающей сети AirMax.

Для оптимизации производительности беспроводной сети, следует определить лучшее соотношение сигнала и помех. Уровень сигнала на приеме можно предсказать, основываясь на мощности передачи, усилении антенны, расстоянии между приемником и передатчиком и рабочей частоте. Однако, на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц базовые станции (БС) других операторов вносят помехи, которые не всегда можно предсказать. Наилучшим способом определить влияние соседних БС – это проанализировать спектр на этих частотах с помощью анализатора спектра AirView. То есть определить

зависимость между процентом загруженности канала и скоростью передачи информации.

Задачи, которые необходимо решить:

- 1) рассчитать потери в зависимости от расстояния между БС и ТД;
- 2) по спектрограмме частотного диапазона определить мощности сигнала на приеме (в точке доступа) и соседних БС;
- 3) установить зависимость между процентом загруженности канала и скоростью передачи информации.

Для решения этих задач проводился эксперимент в частотном диапазоне 5 ГГц и исследовалась скорость передачи информации в сети связи в зависимости от загруженности радиоэфира. При этом в эксперименте было использовано оборудование американской компания Ubiquiti Networks Nanostation M5 [25].

Исследовалась работа базовой станции, установленной на крыше здания многофункционального комплекса *Almaty Towers*, расположенного в центре города Алматы на улице Байзакова, 280. Высота подвеса БС - 100м. Точку доступа установили на крыше 10-этажного здания компании КРИС-Сервис, по адресу ул.Толе би 180 б, угол улицы Жарокова. Высота 10-этажного здания — 27 метров. Расстояние между базовой станцией и точкой доступа 2 км (рисунок 5.8).

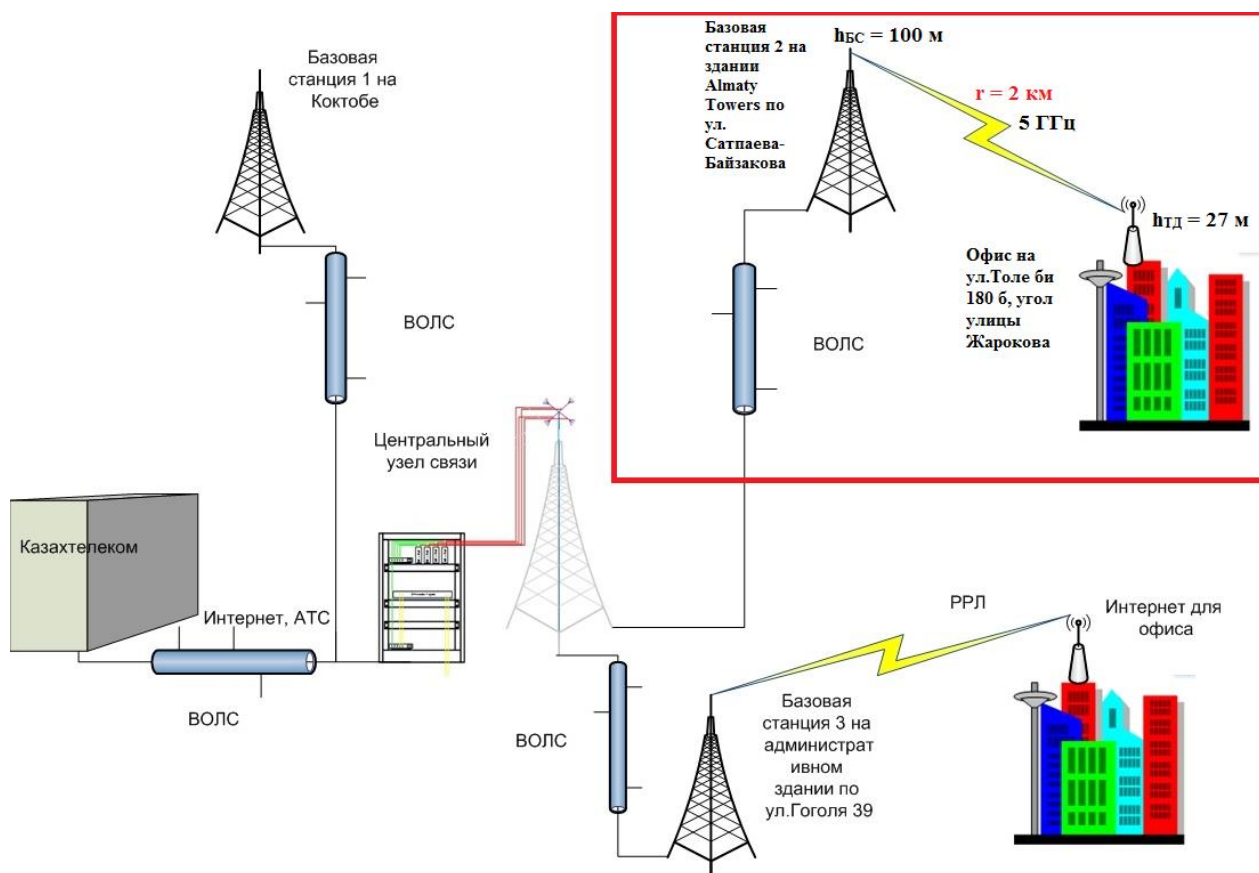


Рисунок 5.8 – Структура сети связи Airmax на основе базовых станций Ubiquiti Nanostation M5 в г. Алматы

Сканирование частотного диапазона 5 ГГц проводилось с помощью специального анализатора спектра Ubiquiti AirView [27-28].

Для проведения эксперимента использовали точку доступа Ubiquiti NanoStation M5 с встроенным анализатором спектра AirView.

На рисунке 5.9 показан результат сканирования частотного диапазона 5 ГГц в данном районе.

В приложении А и приложении Б также приведены рисунки работы с программами.

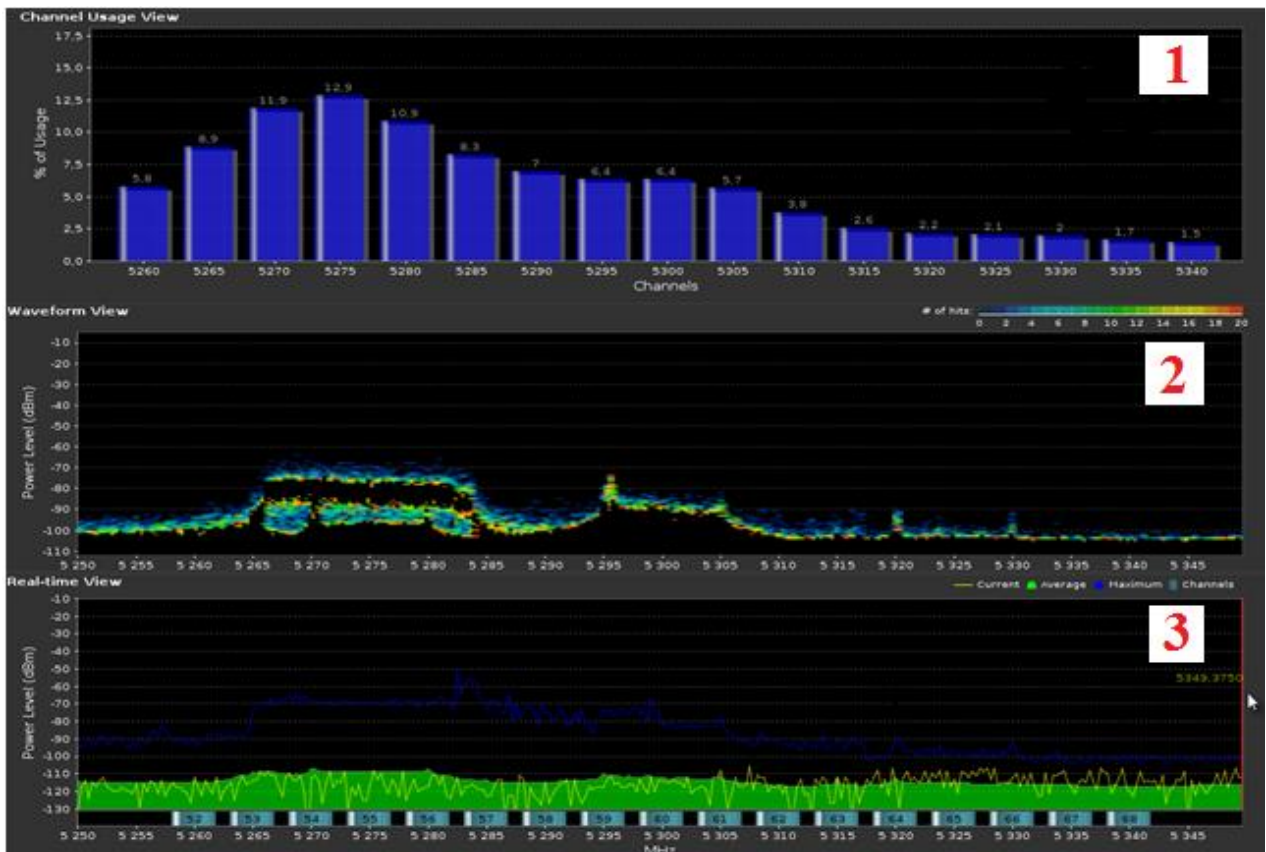


Рисунок 5.9 – Окно программы Ubiquiti AirView: Сканирование частотного диапазона 5 ГГц

### 5.3.1 Расчет параметров сети передачи данных

Требуемые стандартные значения параметров БС и ТД приведены в таблице 5.1.

Коэффициент согласования антенны с радиосигналом по поляризации (для передатчика и приемника) принимается равным  $\xi_{II} = \xi_C = 0,9$ .

КПД передающего и приемного фидеров принимается равным  $\eta_{ФПРД} = \eta_{ФПРМ} = 0,95$ .

Таблица 5.1 – Значения параметров БС и ТД оборудования UBNT

Обозначение	Наименование и единица измерения	Значение
$P_{\text{ПРД БС}}$	Мощность передатчика БС, дБм	+23
$G_{\text{ПРД БС}}$	Коэффициент усиления передающей антенны БС, дБ	16
$f_{\text{ПРД БС}}$	Рабочая частота передачи БС, МГц	5340
$P_{\text{ПРМ ТД}}$	Чувствительность приемника ТД, дБм	-90
$G_{\text{ПРМ ТД}}$	Коэффициент усиления приемной антенны ТД, дБ	16
$f_{\text{ПРМ ТД}}$	Рабочая частота приема ТД, МГц	5340

### 5.3.2 Определение расстояния между БС и ТД, учет потерь при распространении радиоволн

На рисунке 5.10 показаны карта и рельеф местности расположения БС и ТД. БС установлена на крыше здания многофункционального комплекса Almaty Towers, расположенного в центре города Алматы на улице Байзакова, 280. Высота подвеса БС – 100 метров. ТД установили на крыше 10-этажного здания компании КРИС-Сервис, по адресу ул.Толе би 180 б, угол улицы Жарокова. Высота 10-этажного здания — 27 метров.



Рисунок 5.10 – Карта и рельеф местности расположения БС и ТД г. Алматы

Основу территориального планирования составляет энергетический расчет, в процессе которого определяется архитектура сети и ее

пространственные координаты с учетом качества обслуживания и информационной нагрузки. Заданное качество принятого сигнала определяется чувствительностью приемника. В общем виде уравнение передачи может быть представлено как [29]:

$$P_{ПРМ} = \frac{P_{ПРД} \cdot \eta_{ФПРД} \cdot G_{АПРД} \cdot \xi_{П} \cdot G_{АПРМ} \cdot \eta_{ФПРМ} \cdot \xi_{С}}{L_{\Sigma}}, \quad (5.1)$$

где  $P_{ПРМ}$  – мощность радиосигнала на входе приемника (определяется чувствительностью приемника);

$P_{ПРД}$  – мощность передатчика БС;

$\eta_{ФПРД}$ ,  $\eta_{ФПРМ}$  – КПД передающего и приемного фидеров;

$G_{АПРД}$ ,  $G_{АПРМ}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

$\xi_{П}$ ,  $\xi_{С}$  – коэффициенты согласования антенн с радиосигналом по поляризации;

$L_{\Sigma}$  – суммарное затухание радиоволн на трассе.

Значение мощности радиосигнала на входе приемника удобно выражать в децибелах относительно ватта. При этом уравнение (5.1) принимает вид [29]:

$$P_{ПРМ}(\text{дБ} / \text{Вт}) = P_{ПРД}(\text{дБ} / \text{Вт}) + \eta_{ФПРД}(\text{дБ}) + G_{АПРД}(\text{дБ}) + \xi_{П}(\text{дБ}) + G_{АПРМ}(\text{дБ}) + \eta_{ФПРМ}(\text{дБ}) + \xi_{С}(\text{дБ}) - L_{\Sigma}(\text{дБ}). \quad (5.2)$$

По этой формуле определяются суммарные энергетические потери, возникающие на трассе распространения радиоволн [29]:

$$L_{\Sigma}(\text{дБ}) = P_{ПРД} + \eta_{ФПР} + G_{АПРД} + \xi_{П} + G_{АПРМ} + \eta_{ФПРМ} + \xi_{С} - P_{ПРМ} \quad (5.3)$$

Для БС суммарное затухание радиоволн на трассе равно:

Значения берем в дБм:

$$L_{\Sigma \text{ БС}}(\text{дБ}) = P_{ПРД \text{ БС}} + \eta_{ФПР \text{ БС}} + G_{АПРД \text{ БС}} + \xi_{П \text{ БС}} + G_{АПРМ \text{ МС}} + \eta_{ФПРМ \text{ МС}} + \xi_{С \text{ МС}} - P_{ПРМ \text{ МС}} = 23 + 0,95 + 16 + 0,9 + 16 + 0,95 + 0,9 + 90 = 148,7 \text{ дБ}$$

Распространение радиоволн зависит от следующих факторов [29]:

- положения антенны передающей радиостанции;
- рельефа местности;
- типа поверхности земли, на которой размещается система связи.

Определим неравномерность рельефа от БС к ТД с помощью программы Google Earth. Для этого построим рельеф местности в направлении от БС к ТД. На рельефе указываем высоты для следующих точек местности: первая

точка – точка расположения антенн БС; следующие точки выбираем через 0,25 км в этом направлении. Получим по 9 точек в данном направлении, соединив которые плавной линией, определим в соответствующем направлении рельеф местности.

Результаты занесены в таблицу 5.2, рельеф местности показан на рисунке 5.11.

Таблица 5.2 – Рельеф местности в направлении от БС к ТД

Расстояние от БС до ТД, км	Высота над уровнем моря, м
	Направление к ТД
0	786
0,25	789
0,5	794
0,75	798
1	801
1,25	810
1,5	812
1,75	819
2	826

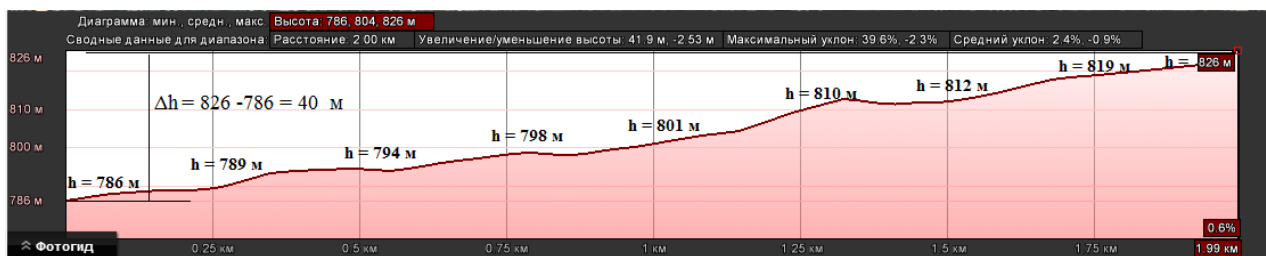


Рисунок 5.11 – Рельеф местности в направлении к ТД

$$\Delta h = 826 - 786 = 40 \text{ м}$$

Определим поправки, учитывающие рельеф местности для данного направления по графику, показанному на рисунке 5.12.

$$\text{При } \Delta h = 40 \text{ м}; L_{PEЛ} = \frac{0 - 1}{2} = -0,5 \text{ дБ};$$

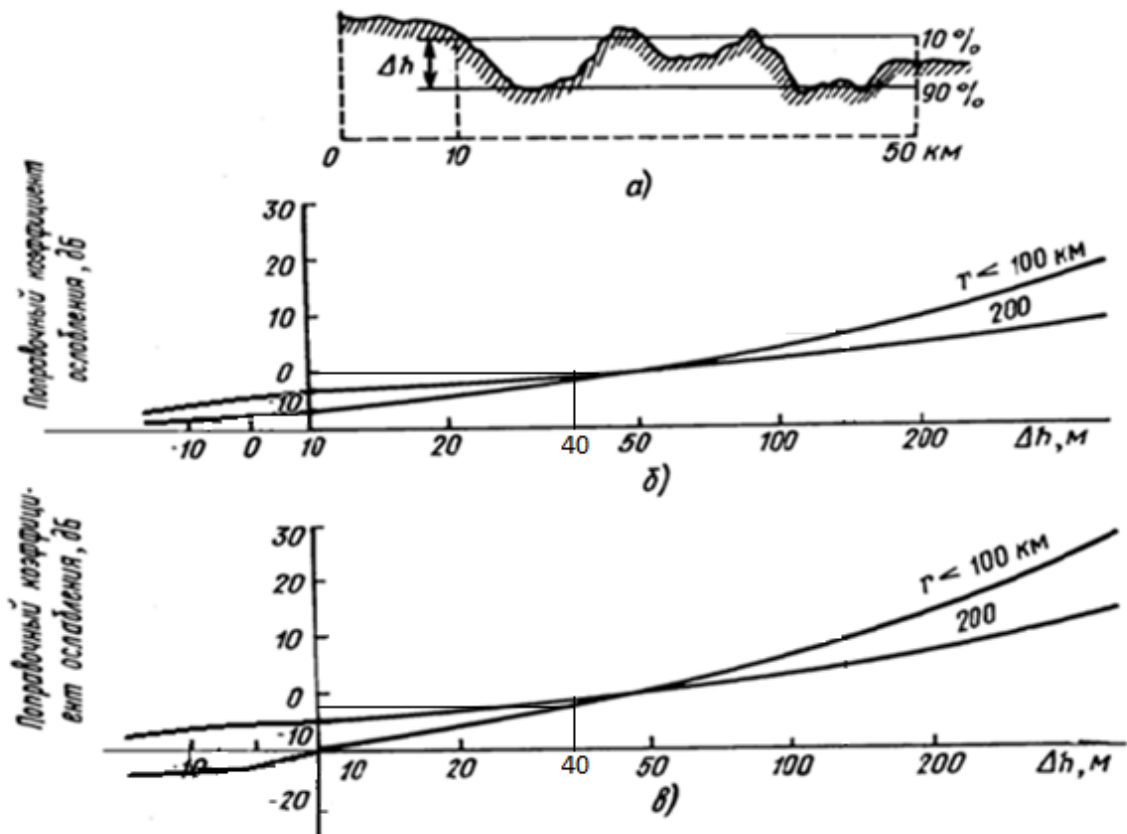


Рисунок 5.12 – График для определения поправки, учитывающей рельеф местности

Определим потери распространения для соответствующего типа местности:

*Расчет дальности связи между БС и ТД:*

$$L_P = L_{\Sigma} - L_{PEЛ} = 148,7 + 0,5 = 149,2 \text{ дБ};$$

Определив потери распространения для соответствующего типа местности  $L_P$ , можно приступить к определению дальности покрытия базовой станции с помощью эмпирических моделей Окомура и Хата.

При этом следует заметить, что все модели предсказания потерь при распространении сигналов для различных типов местности устанавливают зависимость между величиной этих потерь и следующими величинами [29]:

- $f_0$  – частотой, на которой работает система связи (обычно средняя);
- $h_b$  – высотой подвеса антенны базовой станции (БС);
- $h_m$  – высотой положения над землей антенны мобильной станции;
- $r$  – радиусом зоны покрытия базовой станции (БС);



- некоторыми другими параметрами, характерными для данной модели предсказания.

### 5.3.3 Модель Оокура и Хата

Существует большое количество эмпирических моделей предсказания потерь при распространении сигналов для различных типов местности: Модель COST231-Хата, Модель Уолфиша-Икегами, модель Ли, Модель Оокура и Хата и др.

Наиболее известной и применяемой является модель предсказания Оокура и Хата в случае изотропных (идеальных всенаправленных), имеющих коэффициенты усиления, равные 1, антенн базовой станции (БС) и абонентской станции (АС) – точки доступа. Эта формула (метод прогнозирования Оокура и Хата) имеет следующий вид [29]:

$$L_{\text{м}} = \left\{ \begin{array}{l} A + B \left( \frac{4625}{f_0} \right)^2 \\ C + D \left( \frac{4625}{f_0} \right)^2 \end{array} \right. \quad (5.4)$$

где  $r$  – расстояние между антеннами базовой и абонентской станциями, км.

Радиочастота несущей  $f_0$ , МГц, высота антенны базовой станции  $h_b$ , м, и высота антенны абонентской станции  $h_m$ , м; величины  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  выражаются соответственно следующим образом [29]:

$$A = 31.5 - 49.6 \log_{10} \left( \frac{h_b}{1} \right) \quad (5.5)$$

$$B = 49.6 \log_{10} \left( \frac{h_b}{1} \right) \quad (5.6)$$

$$C = 31.5 - 49.6 \log_{10} \left( \frac{h_m}{1} \right) \quad (5.7)$$

$$D = 49.6 \log_{10} \left( \frac{h_m}{1} \right) \quad (5.8)$$

где

$$\log_{10} \left( \frac{h}{1} \right) = \begin{cases} 0 & \text{при } h \leq 1 \\ \log_{10} h & \text{при } h > 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

для средних и малых городов;

$$\log_{10} \left( \frac{h}{1} \right) = \begin{cases} 0 & \text{при } h \leq 1 \\ \log_{10} h & \text{при } h > 1 \end{cases} \quad (5.10)$$

для крупных городов.

Модель Оокура и Хата возникла в результате адаптации эмпирических формул Хата к графикам, составленным Оокура и его соавторами.

Определим дальность покрытия БС и ТД при:

$h_b = 100$  м – высота антенны БС;  $h_m = 27$  м – высота антенны ТД.

*Расчет дальности связи между БС и ТД:*

$$f_0 = 5340 \text{ МГц};$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot \left[ \lg(11,75 \cdot 27) \right]^2 - 4,97 = 15,05;$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(5340) - 13,82 \cdot \lg(100) - 23,12 = 124,37;$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(27) = 31,8;$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) \text{ - для городской зоны;}$$

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}}$$

Отсюда дальность связи равна:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{149,2 - 127,37}{31,8}} = 6 \text{ км.}$$

Также расчеты произведем в программном продукте MS Excel. Результаты которого представлены в таблице 5.3.

В приложении Г показаны расчеты, выполненные в программном продукте MathCAD.

Таблица 5.3 – Результаты расчётов дальности связи с помощью модели Оокура и Хата при  $h_{БС}=100$  м и  $h_{ТД}=27$  м в программе MS Excel

$f_0$ , МГц	$h_{БС}$ , м	$h_{ТД}$ , м	$a(h_{ТД})$	A	B	$L_p$ , дБ	r, км
5340	100	27	15,05	124,37	31,8	149,2	6 км

Дальность связи, получилась равной  $r = 6$  км (как и указано в технических характеристиках оборудования).

На практике расстояние между БС и ТД равно 2 км.

Найдем потери, при различных расстояниях – r, км по формуле (5.11) для городской зоны:

$$L_p = A + B \cdot \lg(r) \quad (5.11)$$

Расчет произведем в программе MS Excel, результаты которого представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Расчет потерь для различных расстояний – r, км

r, км	L <sub>p</sub> , дБ
0,5	114,80
1	124,37
1,5	129,97
<b>2</b>	<b>133,94</b>
2,5	137,02
3	139,54
3,5	141,67
4	143,52
4,5	145,14
5	146,60
5,5	147,91
6	149,12

На практике расстояние между БС и ТД равно 2 км.

Жирным шрифтом в таблице 5.4 выделены потери для 2 км.

Потери для r = 2км по графику (рисунок 5.13) равны L<sub>p</sub> = 133,94 дБ.

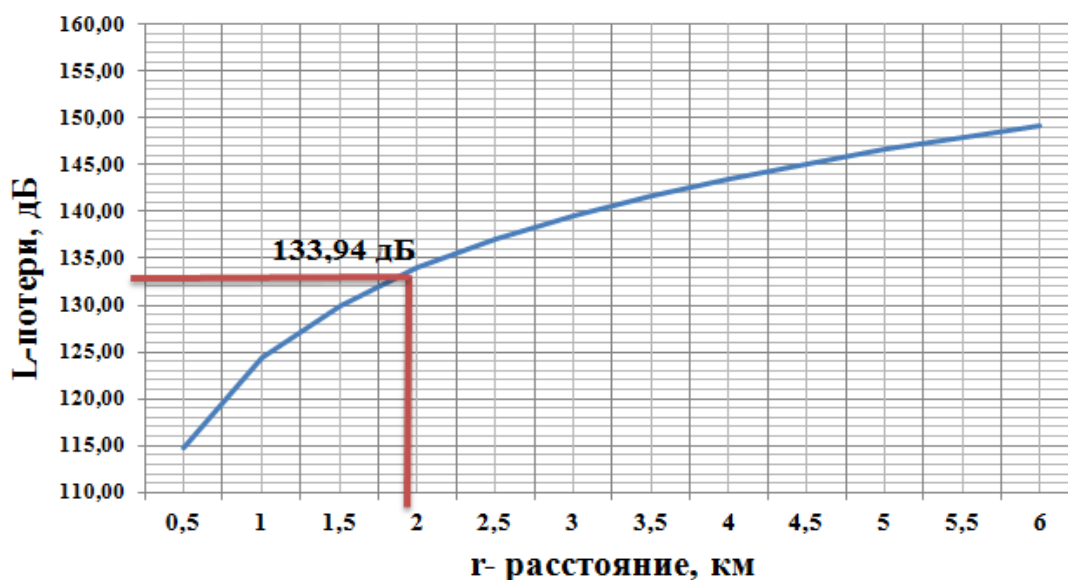


Рисунок 5.13 – График зависимости энергетических потерь, возникающих на трассе распространения радиоволн от расстояния

Полная мощность принятого сигнала на расстоянии 2 км:

$$S = P_{\text{прд БС}} - L = +23 - 133,94 = -110,94 \text{ дБм.}$$

По формуле Шеннона, максимальная скорость передачи данных  $C$  (пропускная способность или емкость канала связи) равна [11,30]:

$$C = BW \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (5.12)$$

где  $C$  — емкость канала, Мбит/с;  
 $BW$  — полоса пропускания канала, МГц;  
 $S$  — полная мощность принятого сигнала, дБм;  
 $N$  — мощность соседних БС, дБм (шумовая составляющая), тепловой шум не учитывался;  
 $S/N$  — отношение сигнал-шум.

В таблице 5.5 представлены результаты расчетов  $S/N \geq 3$  для  $C = 10$  Мбит/с.

А на рисунке 5.14 представлена зависимость скорости передачи данных от отношения сигнал/шум ( $S/N$ ).

Жирным шрифтом в таблице 5.5 указаны значения отношения сигнал/шум, при которых будет обеспечена скорость в 10 Мбит/с и выше.

Также в приложении В показаны скорости передачи данных по каналу связи от БС к ТД, снятые с помощью программы AirView.

Таблица 5.5 – Результаты расчетов по формуле Шеннона

S, дБм	г, км	Lp, дБ	C, Мбит/с	BW, МГц	N, дБм	S/N
-110,94	2,00	133,94	2	5,00	-347,22	0,32
-110,94	2,00	133,94	3	5,00	-215,12	0,52
-110,94	2,00	133,94	4	5,00	-149,70	0,74
-110,94	2,00	133,94	5	5,00	-110,94	1
-110,94	2,00	133,94	6	5,00	-85,51	1,3
-110,94	2,00	133,94	7	5,00	-67,69	1,64
-110,94	2,00	133,94	8	5,00	-54,61	2,03
-110,94	2,00	133,94	9	5,00	-44,69	2,48
<b>-110,94</b>	<b>2,00</b>	<b>133,94</b>	<b>10</b>	<b>5,00</b>	<b>-35,00</b>	<b>3</b>
<b>-110,94</b>	<b>2,00</b>	<b>133,94</b>	<b>11</b>	<b>5,00</b>	<b>-30,86</b>	<b>3,59</b>
<b>-110,94</b>	<b>2,00</b>	<b>133,94</b>	<b>12</b>	<b>5,00</b>	<b>-25,93</b>	<b>4,28</b>

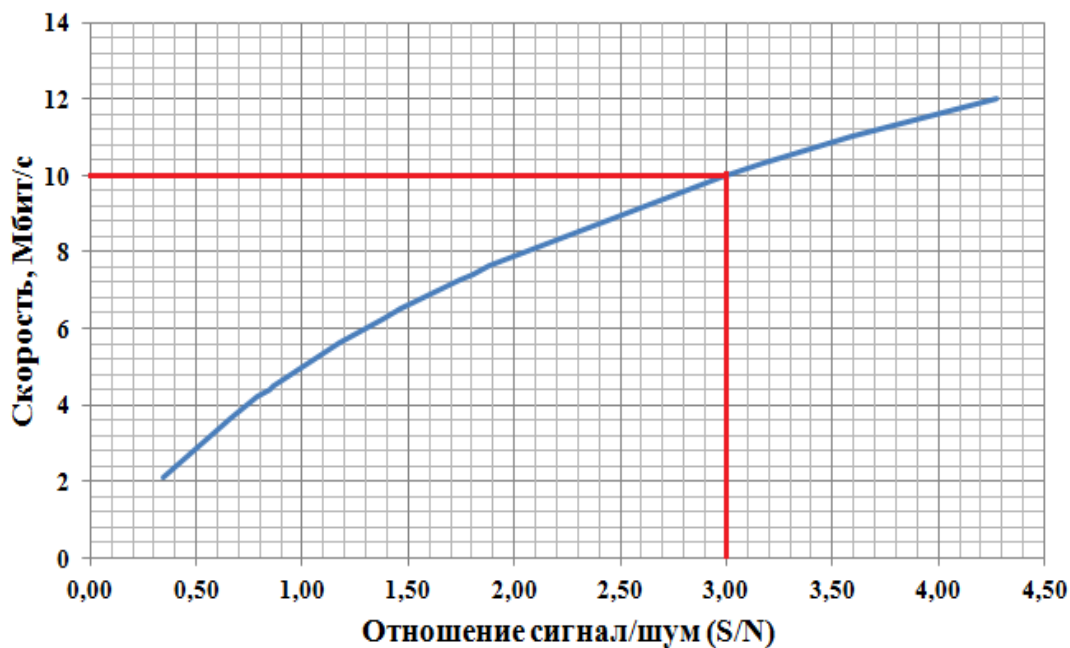


Рисунок 5.14 – Зависимость скорости передачи от отношения сигнал/шум (S/N)

Для обеспечения скорости 10 Мбит/с, мощность шума соседних БС должна быть максимум 35,00 дБм (по модулю) и менее – см. рисунок 5.15.

### 5.3.4 Обработка экспериментальных данных

По спектрам, полученным в результате сканирования частотного диапазона 5250-5345 МГц (рисунок 5.9), определим значения N для всех каналов – таблица 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты эксперимента

№ канала	Частота, МГц	S – Полная мощность, дБм	P- текущая мощность, дБм	N – мощность шума соседних БС	S/N	Обеспечит ли скорость 10 Мбит/с
<b>52</b>	<b>5260</b>	<b>-119</b>	<b>-91,2</b>	<b>27,8</b>	<b>4,28</b>	<b>Да</b>
53	5265	-120,8	-80,2	40,6	2,98	Нет
54	5270	-120,6	-68,6	52	2,32	Нет
55	5275	-118,2	-70	48,2	2,45	Нет
56	5280	-122,0	-70,4	51,6	2,36	Нет
57	5285	-121,8	-62,8	59	2,06	Нет
58	5290	-115,6	-75,6	40	2,89	Нет
59	5295	-118,0	-77,4	40,6	2,91	Нет
60	5300	-117,2	-76,0	41,2	2,84	Нет
<b>61</b>	<b>5305</b>	<b>-115,4</b>	<b>-87,2</b>	<b>28,2</b>	<b>4,09</b>	<b>Да</b>
<b>62</b>	<b>5310</b>	<b>-118,2</b>	<b>-91,2</b>	<b>27,0</b>	<b>4,38</b>	<b>Да</b>
<b>63</b>	<b>5315</b>	<b>-117,8</b>	<b>-91,4</b>	<b>26,4</b>	<b>4,46</b>	<b>Да</b>
<b>64</b>	<b>5320</b>	<b>-115,2</b>	<b>-95,6</b>	<b>19,6</b>	<b>5,88</b>	<b>Да</b>
<b>65</b>	<b>5325</b>	<b>-114,2</b>	<b>-94,0</b>	<b>20,2</b>	<b>5,65</b>	<b>Да</b>
<b>66</b>	<b>5330</b>	<b>-112,8</b>	<b>-98</b>	<b>14,8</b>	<b>7,62</b>	<b>Да</b>
<b>67</b>	<b>5335</b>	<b>-113,6</b>	<b>-100,6</b>	<b>13,0</b>	<b>8,74</b>	<b>Да</b>
<b>68</b>	<b>5340</b>	<b>-114,4</b>	<b>-100,8</b>	<b>13,6</b>	<b>8,41</b>	<b>Да</b>

Жирным шрифтом в таблице 5.6 выделены каналы, которые могут обеспечить скорость передачи данных в 10 Мбит/с и выше.

Для всего частотного диапазона по рисунку 5.9 определим среднее значение мощностей –таблица 5.7.

Таблица 5.7 – Среднеарифметические значения мощностей

S - полная мощность, дБм	P- текущая мощность, дБм	N-мощность шума, дБм	S/N
-117,34	-84,18	33,16	3,54

По результатам проведенного эксперимента, для обеспечения скорости 10 Мбит/с, полная мощность шума соседних БС - N должна быть 33,16 дБм (по модулю) и меньше (рисунок 5.15).

Погрешность результатов экспериментальных и теоретических значений определяется по формуле:

$$\delta(\%) = \left( \frac{|x - x_0|}{x} \right) \cdot 100, \quad (5.13)$$

где  $x$  – расчетные значения;  $x_0$  – экспериментальные значения.

$$\delta(\%) = \left( \frac{|35,00 - 33,16|}{35,00} \right) \cdot 100 = 5,3 \%$$

Погрешность результатов экспериментальных и теоретических значений составляет 5,3 %.

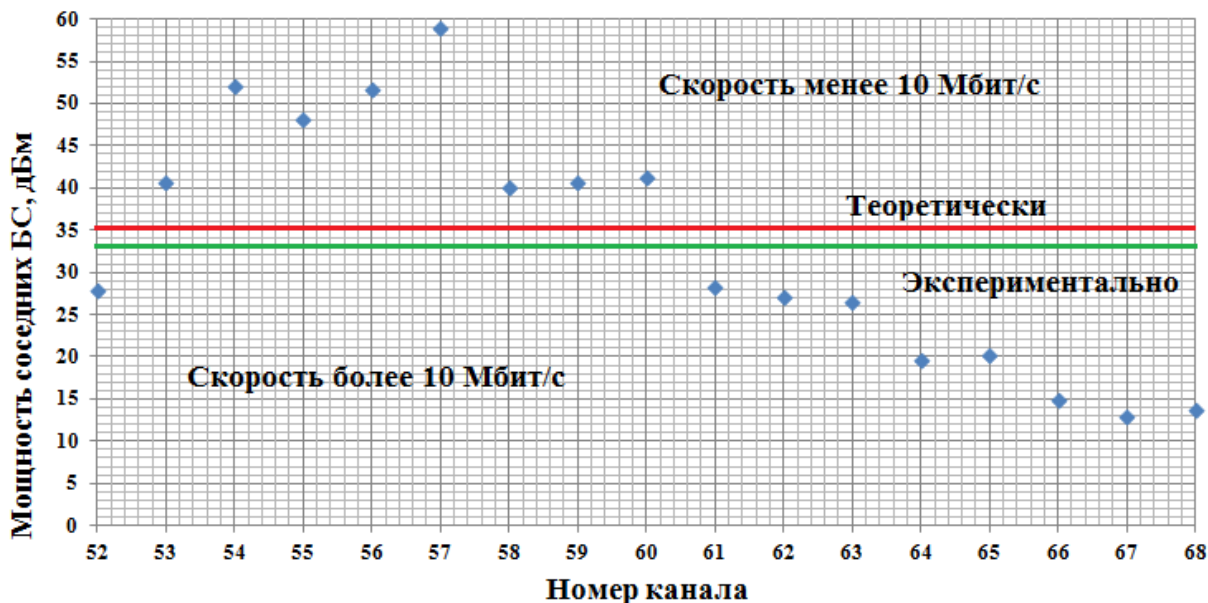


Рисунок 5.15 – Граничные значения мощности соседних БС

На рисунке 5.16 представлена диаграмма загрузки каналов в данном частотном диапазоне в процентах. На рисунке 5.17 показаны граничные значения процента загрузки канала для обеспечения скорости в 10 Мбит/с.

**Диаграмма использования канала в %**

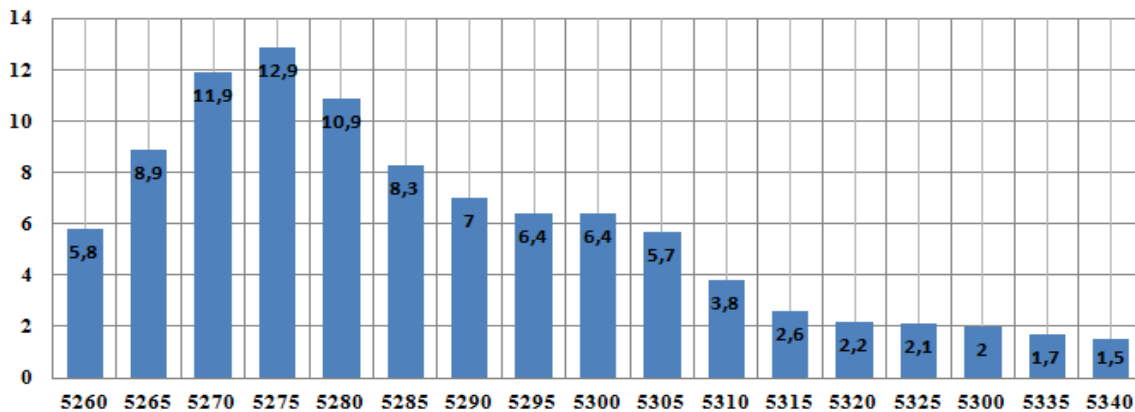


Рисунок 5.16 – Диаграмма использования канала в %

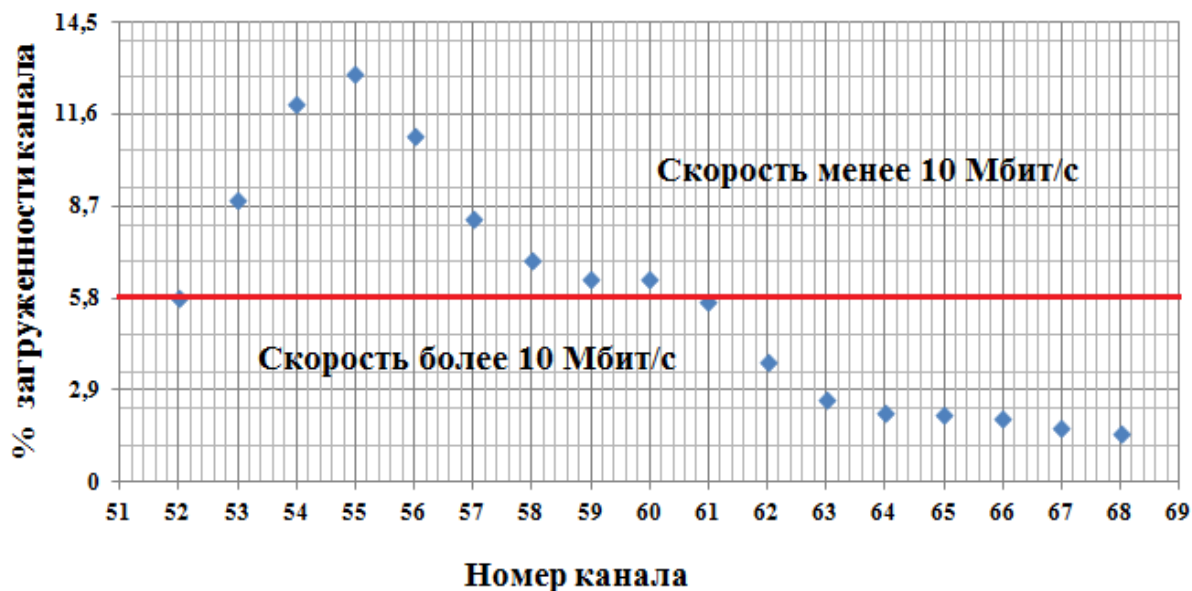
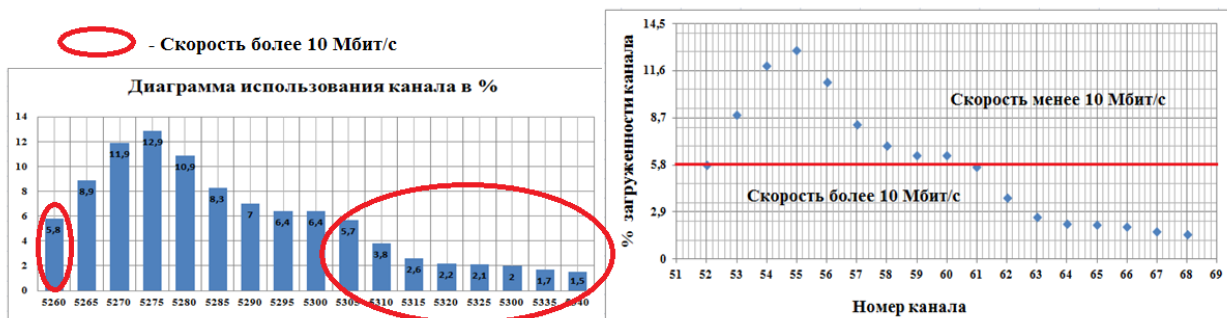


Рисунок 5.17 – Граничные значения загрузки каналов в %

Для наглядного представления на объединенном рисунке 5.18а представлена диаграмма загрузки каналов в данном частотном диапазоне в процентах. На рисунке 5.18б показаны граничные значения процента загрузки канала для обеспечения скорости в 10 Мбит/с.



- а) б)  
 а) диаграмма использования канала в %;  
 б) граничные значения загрузки каналов в %.

Рисунок 5.18 – Каналы со скоростями 10 Мбит/с и более



## **Вывод**

В данной диссертационной работе проводилось исследование скорости передачи данных в зависимости от загруженности канала (в %) в сети связи, работающей по технологии AirMax.

Это сделано для оптимизации производительности беспроводной сети; обеспечения гарантированной скорости передачи данных в 10 Мбит/с и повышения надежности работы беспроводного канала связи.

Реальное расстояние между БС и ТД составляет 2 км, хотя расчеты показали, что при допустимом уровне потерь 149,21 дБ, дальность связи может быть увеличена до 6 км, что соответствует техническим характеристикам аппаратуры.

Экспериментальные потери составили 133,94 дБ.

Так как соседние каналы могут быть заняты другими операторами, результаты эксперимента показали, что:

- значение заявленной скорости в 10 Мбит/с и выше будет обеспечено, если мощность соседних БС составит 33,16 дБ и ниже;

- значение скорости в 10 Мбит/с и выше будет обеспечено, если загруженность каналов в процентах (другими операторами) будет ниже 5,8 %.

Относительная погрешность между экспериментальным и теоретическим значениями мощности соседних БС равна 5,3 %.

## Заключение

Технология AirMax, в настоящее время активно внедряемая в городе Алматы, для создания широкополосных беспроводных сетей передачи данных и голоса, – это новая технология, разработанная фирмой Ubiquiti Networks (UBNT), которая включает в себя поддержку стандартов 802.11 a/n, а также уникальную систему поллинга.

*AirMax* – это особый радио-протокол, позволяющий работать с беспроводными сетями, имеющими частоты 2,4-5 ГГц [4].

С помощью этой технологии можно создать сеть, обладающую высокой пропускной способностью, высоким качеством передачи данных и голоса с малой задержкой. Решение использует протокол TDMA с аппаратным ускорением.

Фирма Ubiquiti Networks (UBNT) выпускает аппаратуру, поддерживающую технологию AirMax, что обеспечивает минимальные расходы при развертывании беспроводных сетей связи.

Оператор, работающий по технологии AirMax, производит мониторинг сети, используя анализатор спектра AirView.

*AirView* – анализатор частотного спектра фирмы Ubiquiti Networks, с помощью которого можно определить наилучшие каналы в конфигурации беспроводной сети, позволяющие обеспечить заявленную скорость в 10 Мбит/с и выше.

Технология AirMax – это гибкая технология, которая позволяет создавать сети с шириной канала 5/10/20/40 МГц.

Применять различные антенные конфигурации:

- SISO 1×1;

- MIMO с конфигурациями 2×2, 2×3, 3×3, 4×4.

Сочетание этих технологий позволяет обеспечивать скорость передачи данных начиная от 10 Мбит/с до 300 Мбит/с.

В данной диссертационной работе использовалась технология SISO с конфигурацией 1×1. Определены количественные характеристики мощностей соседних базовых станций и проценты загрузки каналов, которые обеспечивают скорость передачи данных 10 Мбит/с и выше.

## **Список сокращений**

UBNT – Ubiquiti Networks

TDMA – Time Division Multiple Access

CSMA – Carrier Sense Multiple Access

TDM – Time Division Multiplexing

MIMO – Multiple Input Multiple Output

SISO – Single Input Single Output

WLAN – Wireless Local Area Network

HT – High Throughput

MCS – Modulation and Coding Scheme

BPSK – Binary Phase Shift Keying

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

SFI – Short Guard Interval

ISI – Inter-Symbol Interference

WEP – Wired Equivalent Privacy

KSA – Key Scheduling Algorithm

MIC – Message Integrity Check

ICV – Integrity Check Value

CRC32 – 32-bit Cyclical Redundancy Check

PoE – Power over Ethernet

БС – Базовая станция

ППД – прием-передача данных

ТД – Точка доступа

## Список литературы

- 1 Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. –М.:Эко-Трендз, 2011, стр.6-8
- 2 Дмитриев Владимир.Технологии беспроводной передачи данных. Статья с сайта – [http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2003\\_02\\_64.pdf](http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2003_02_64.pdf).
- 3 Финогеев А.Г. Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки. Пензенский ГУ. Статья – <http://ict.informika.ru/ft/005654/62331e1-st18.pdf>
- 4 Ubiquiti AirMax. Сайт <http://27sysday.ru/setevoe-oborudovanie/ubiquiti-airmax>. Дата обращения 30.09.2014.
- 5 Технология AirMax от Ubiquiti Networks. Сайт <http://www.netbym.ru/information/info-119.html>. Дата обращения 06.10.2014.
- 6 Что такое AirMax в Wi-Fi устройствах? Сайт <http://lantorg.com/article/chto-takoe-airmax>. Дата обращения 15.10.2014.
- 7 Беспроводная связь. Сайт <http://www.airmax.ru/articles/>. Дата обращения 20.10.2014.
- 8 Фирменная технология Ubiquiti AirMax. Сайт <http://www.5mhz.ru/art/231/>. Дата обращения 3.11.2014.
- 9 TDMA. Сайт <http://www.trubka.ua/glossary/TDMA.html>. Дата обращения 12.11.2014.
- 10 Обзор airMAX ac, серия устройств airMAX ac. Сайт <http://www.ubnt.ru/review/airmax-ac.htm>. Дата обращения 19.11.2014.
- 11 Станислав Рыбалко. Беспроводные сети. Практическое руководство. Издание седьмое, обновленное. - Москва, 2012 г.
- 12 Марчук А.В. Адаптивный к сигнально-помеховой обстановке метод цифровой обработки сигналов на основе вейвлет преобразований в приемных каналах систем радиодоступа ММО. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Выпуск № 5 (43) / том 1 / 2010. – <http://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-k-signalno-pomehovoy-obstanovke-metod-tsifrovoy-obrabotki-signalov-na-osnove-veyvlet-preobrazovaniy-v-priemnyh-kanalah-sistem>. Дата обращения 05.11.2014.
- 13 Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релеевском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11.
- 14 N. A. Podolskaya, F. N. Sherstyuk, The problem of Wi-Fi radio fading simulation: solution and applications, *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika*, vol. 13 (2011), № 1.
- 15 Carroll M., Wysocki T. A. Fading characteristics for indoor wireless channels at 5GHz unlicensed bands.—[http://www.elec.uow.edu.au/people/staff/wysocki/publications/Fading\\_Characteristics\\_v2.1.pdf](http://www.elec.uow.edu.au/people/staff/wysocki/publications/Fading_Characteristics_v2.1.pdf).
- 16 Пахомов С. Технологии беспроводных сетей семейства 802.11.- <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=10695>

17 А. К. Щербаков. Wi-Fi: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить. – Москва. Литературное агентство «Бук-Пресс» 2012. – [http://warfictionbook.Ruauthor/a\\_k\\_sherbakov/wi-fi\\_vse\\_chno\\_viy\\_hoteli\\_znat\\_no\\_boyalis\\_sprosit/download.ab.pdf](http://warfictionbook.Ruauthor/a_k_sherbakov/wi-fi_vse_chno_viy_hoteli_znat_no_boyalis_sprosit/download.ab.pdf)

18 Научно-технический журнал «Теория и техника радиосвязи» № 1 /2013 - [http://www.sozvezdie.su/uploads/files/files/ttr/ttr\\_2013\\_1.pdf](http://www.sozvezdie.su/uploads/files/files/ttr/ttr_2013_1.pdf)

19 Агафонов Н. Технологии беспроводной передачи данных ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi. Статья – [http://www.wirelesse.ru/assets/files/pdf/2006\\_1\\_10.pdf](http://www.wirelesse.ru/assets/files/pdf/2006_1_10.pdf)

20 Вишневский В.М., Ляхов А.И. Региональные беспроводные сети передачи данных на базе протокола Radio-Ethernet: состояние, моделирование, примеры реализации. Информационные процессы Том 1 № 1, 2011. - Сайт <http://jip.ru/2001/VISHN-1.pdf>. Дата обращения 11.12.2014.

21 Базовые положения стандарта IEEE 802.11n для сетей Wi-Fi, статья с сайта <http://zyxel.kz/kb/2105>. Дата обращения 09.12.2014.

22 Ешевский О.Ю., Лагунов А.Ю. Использование статистической теории для увеличения скорости работы сети стандарта 802.11n в помещении. Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. Выпуск № 2 / 2010. – <http://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-statisticheskoy-teorii-dlya-velicheniya-skorosti-raboty-seti-standarta-802-11n-v-pomeschenii>

23 Монин С. Защита информации и беспроводные сети. – <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=10514&iid=430>

24 Уязвимость шифрования WEP. Сайт <http://sotsprof.net/wi-fi/uyazvimost-shifrovaniya-wep>. Дата обращения 05.01.2015.

25 Точка доступа Ubiquiti NanoStation M5. Сайт <http://www.ubnt.ru/ubiquiti/nanostation-m5.htm>. Дата обращения 02.02.2015.

26 Обзоры и сравнения новинок Ubiquiti. Сайт <http://www.ubnt.ru/info/technicalinformation.htm#>. Дата обращения 06.04.2015.

27 Частотный выбор каналов AirView. Статья с сайта [http://www.technotrade.com.ua/Articles/AirView\\_selecting\\_channels\\_frequency.php](http://www.technotrade.com.ua/Articles/AirView_selecting_channels_frequency.php). Дата обращения 20.04.2015.

28 AirView – анализатор спектра фирмы Ubiquiti Networks. Сайт <http://asp24.com.ua/blog/vvvaairview-analizator-spektra-ubiquiti-networks/>. Дата обращения 05.05.2015.

29 Агатаева Б.Б., Сарженко Л.И. Мобильные телекоммуникации и цифровые системы передачи. Методические указания и задания к выполнению курсовой работы для студентов всех форм обучения специальности 5В0719 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации. – Алматы: АИЭС, 2010.

30 Savo Glisic, Beatriz Lorenzo Advanced Wireless Networks: Cognitive, Cooperative & Opportunistic 4G Technology. Wiley – 2011.

31 Учебно-методические и учебные работы. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию учебно-методических и учебных работ. Коньшин С.В., Кондратович А.П. – Алматы АИЭС, 2014.

## Приложение А

### Местоположение БС и ТД, рельеф местности на этом участке

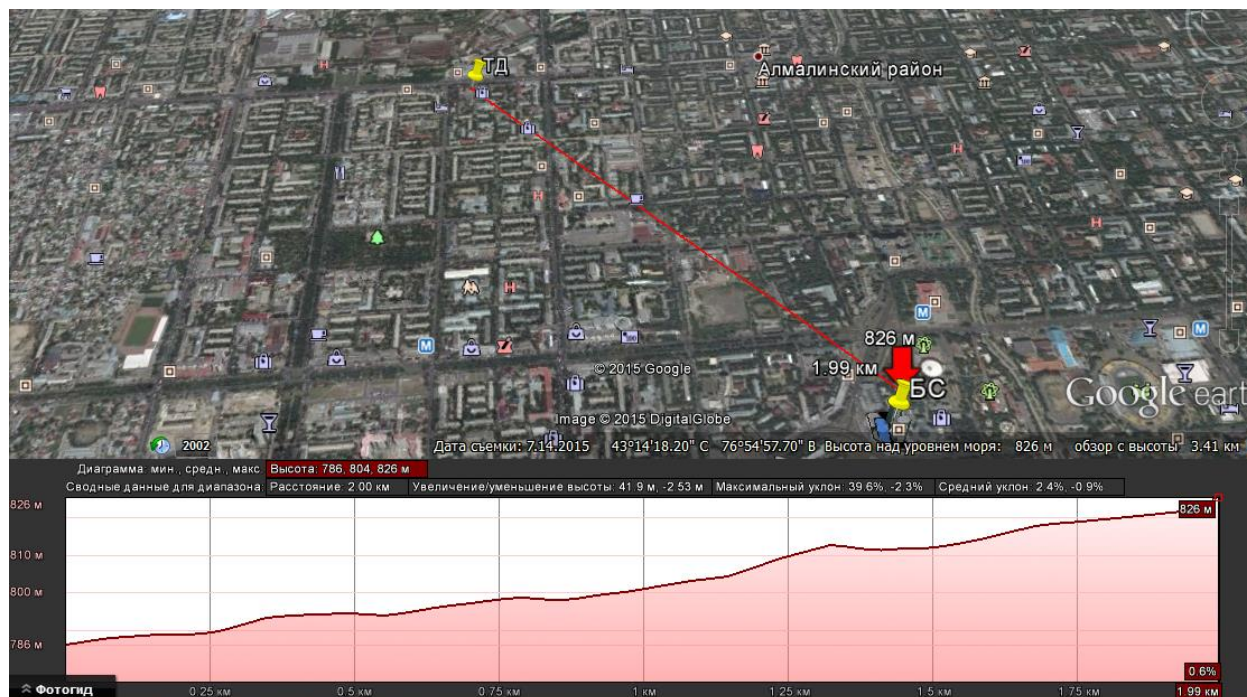


Рисунок А.1 – Окно программы Google Earth: Карта и рельеф местности расположения БС и ТД в г. Алматы

# Приложение Б

## Сканирование частотного диапазона 5 ГГц в г.Алматы при проведении экспериментов

### Эксперимент № 1

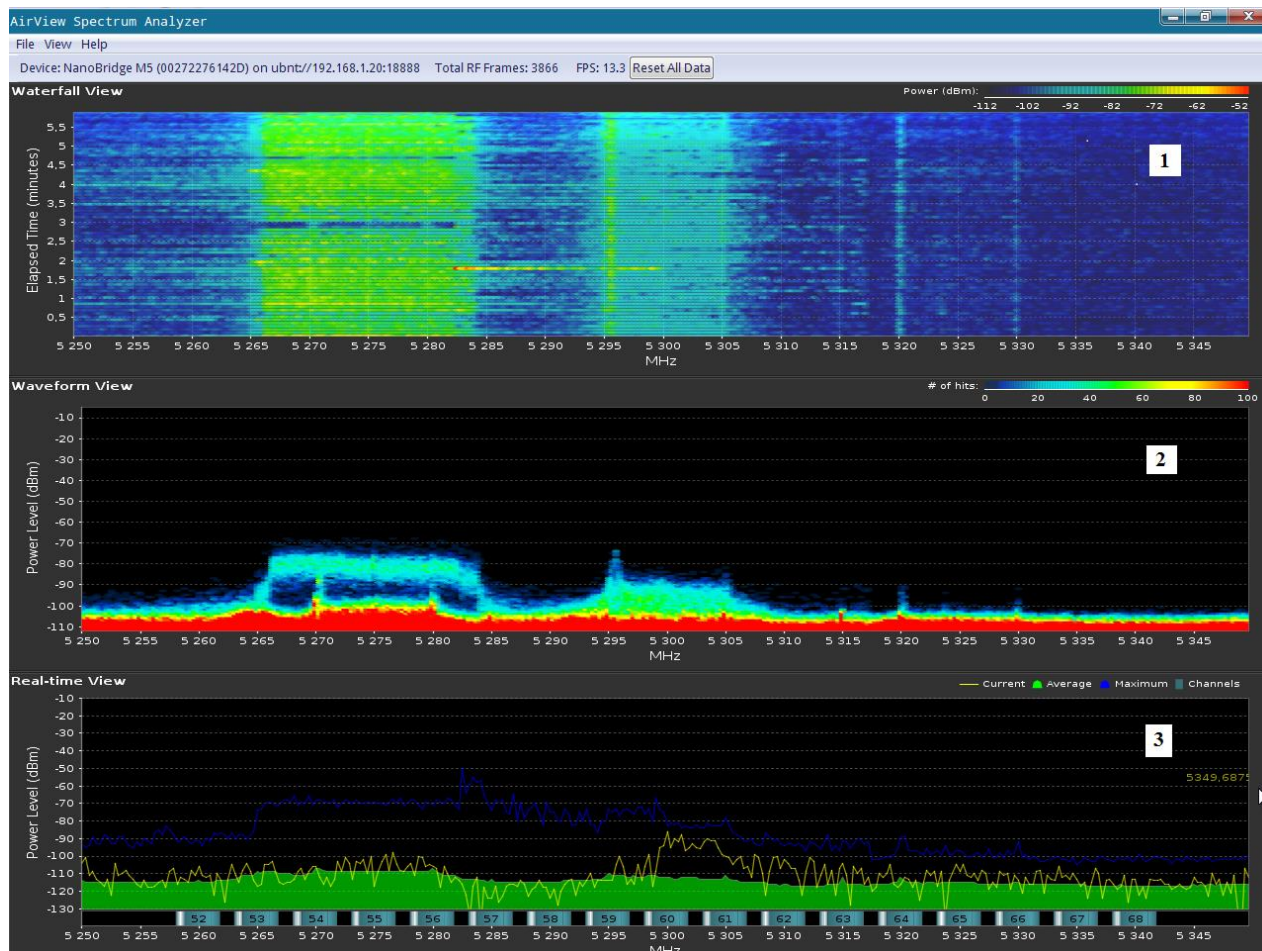


Рисунок Б.1 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – График Waterfall View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 1

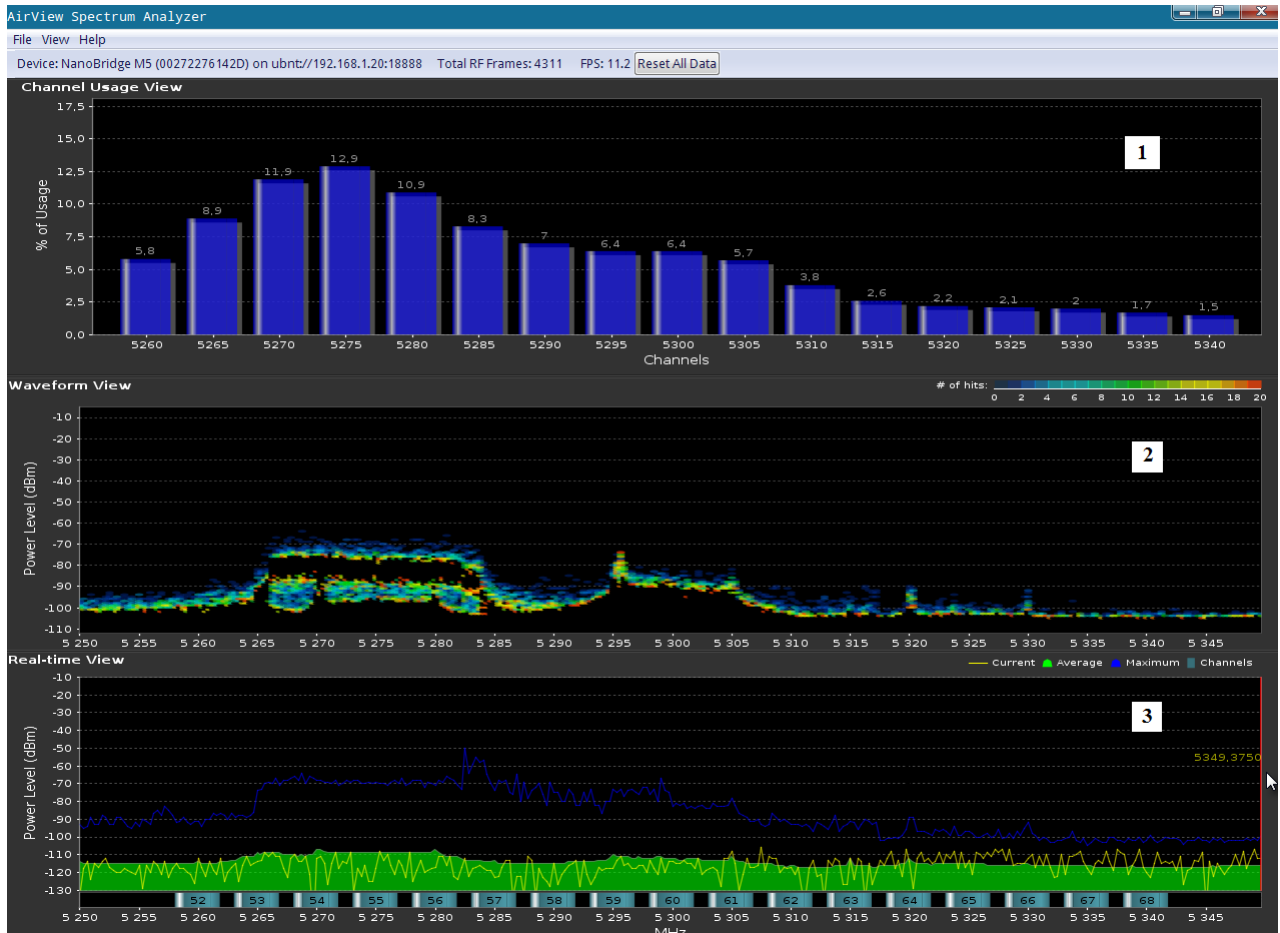


Рисунок Б.2 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – Диаграмма использования канала в % - Channel Usage View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)



## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 2

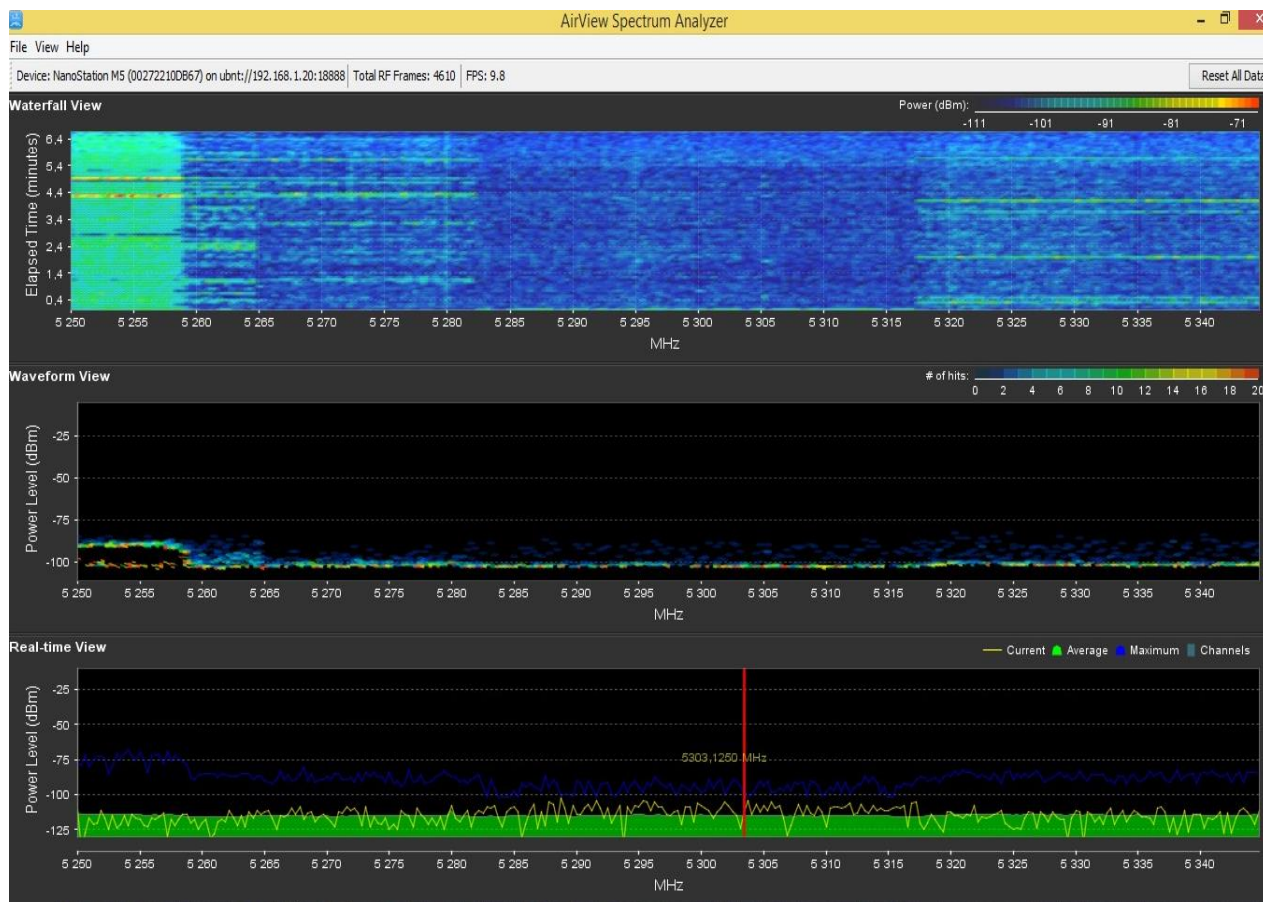


Рисунок Б.3 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – График Waterfall View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 2



Рисунок Б.4 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – Диаграмма использования канала в % - Channel Usage View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 3



Рисунок Б.5 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – Диаграмма использования канала в % - Channel Usage View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 4

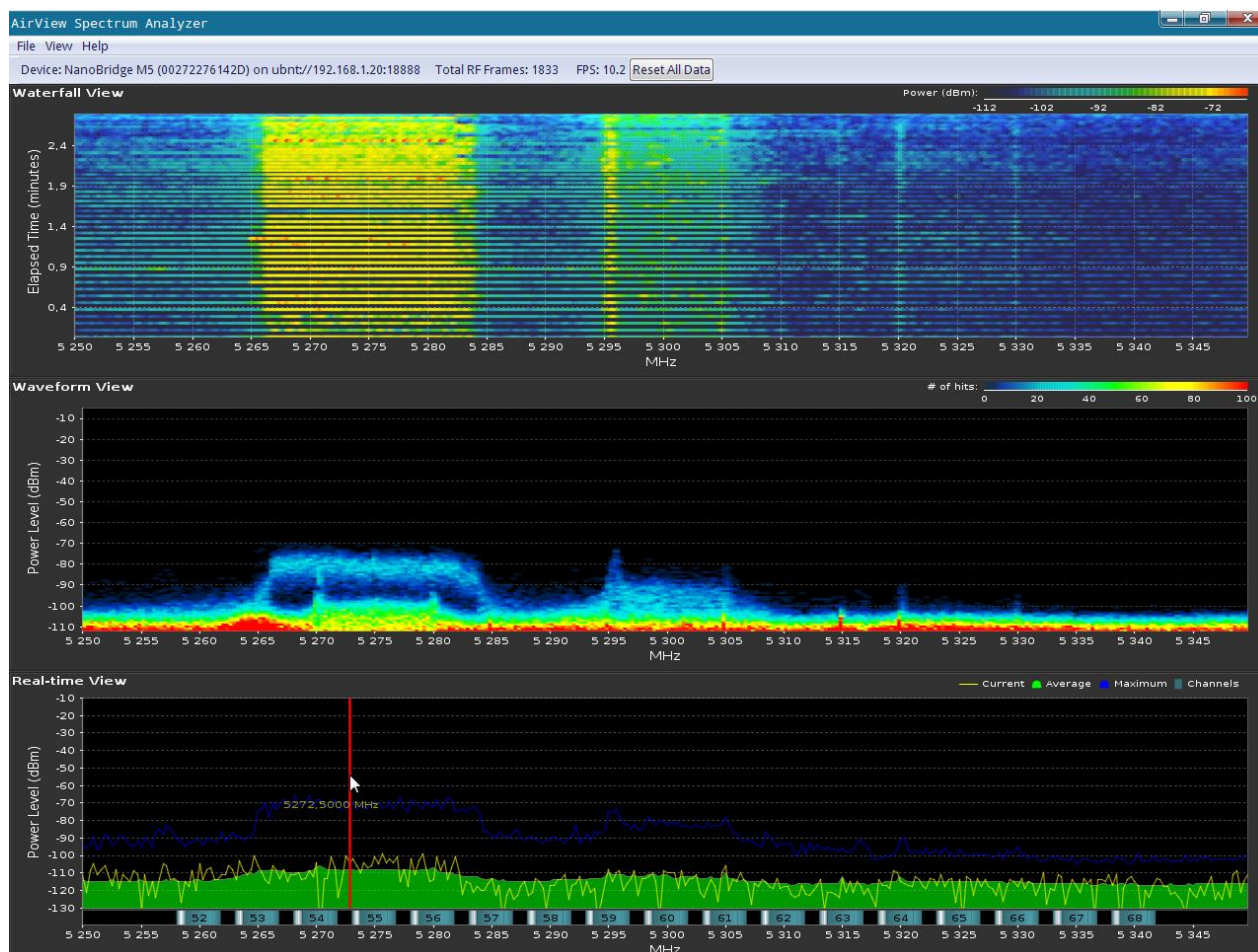


Рисунок Б.6 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – График Waterfall View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 5



Рисунок Б.7 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – Диаграмма использования канала в % - Channel Usage View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Продолжение приложения Б

### Эксперимент № 6

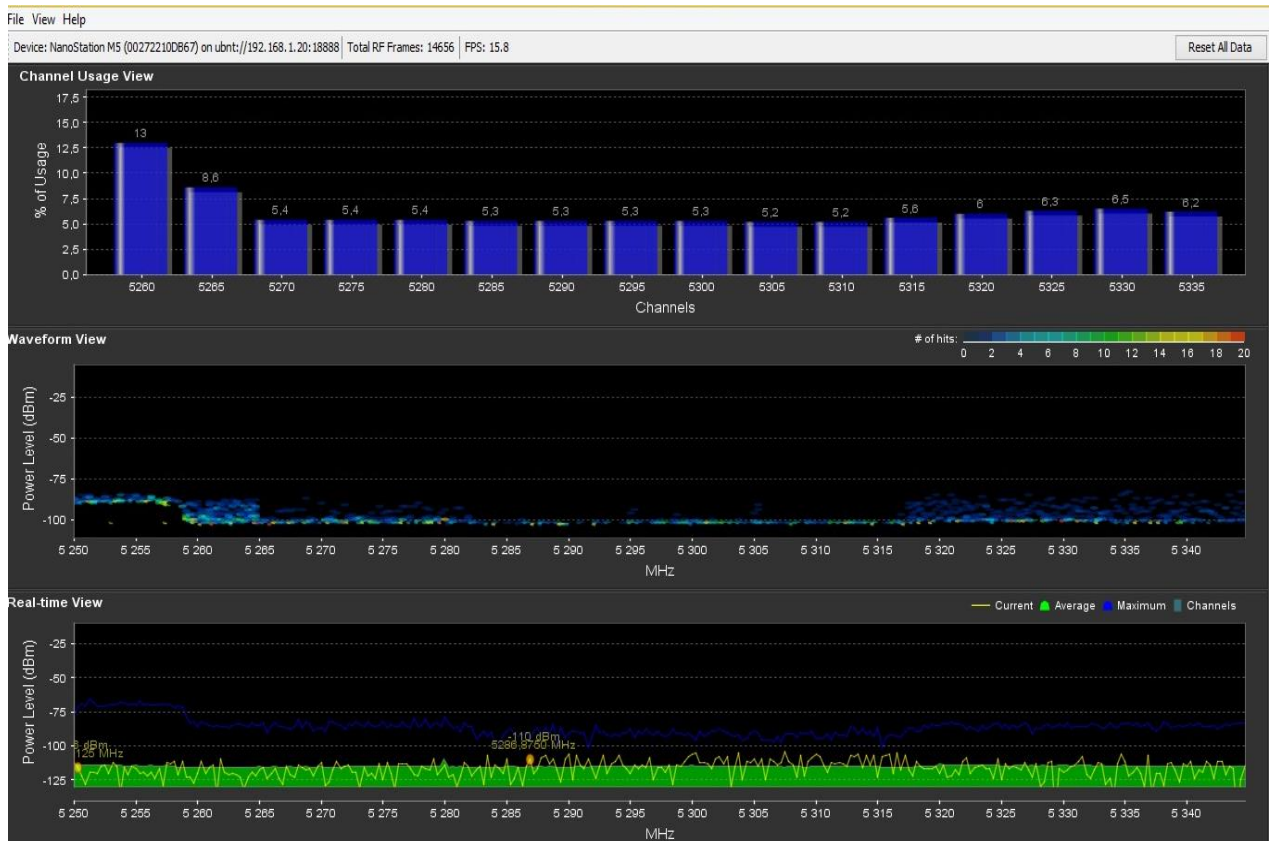


Рисунок Б.8 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: сканирование частотного диапазона 5 ГГц ( 1 – Диаграмма использования канала в % - Channel Usage View; 2 – График Waveform View; 3 – График Real-time View)

## Приложение В Скорости передачи данных

Monitor

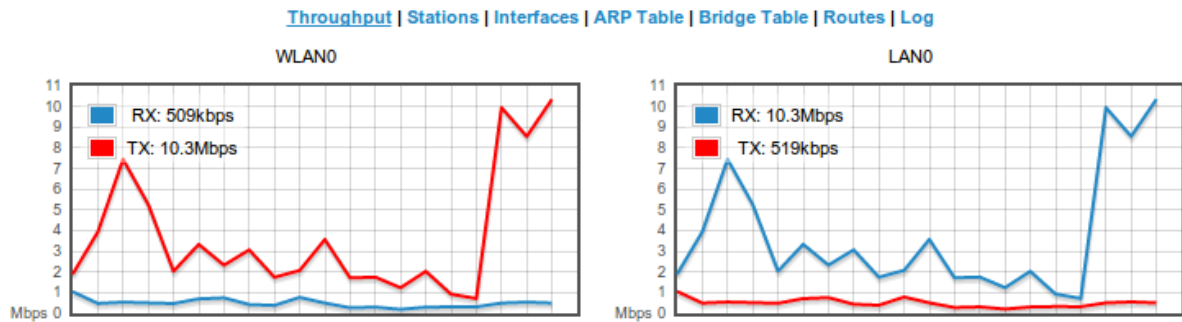


Рисунок В.1 – Окно программы AirView Spectrum Analyzer: Скорость передачи данных по каналу связи от БС к ТД в эксперименте № 1

Monitor

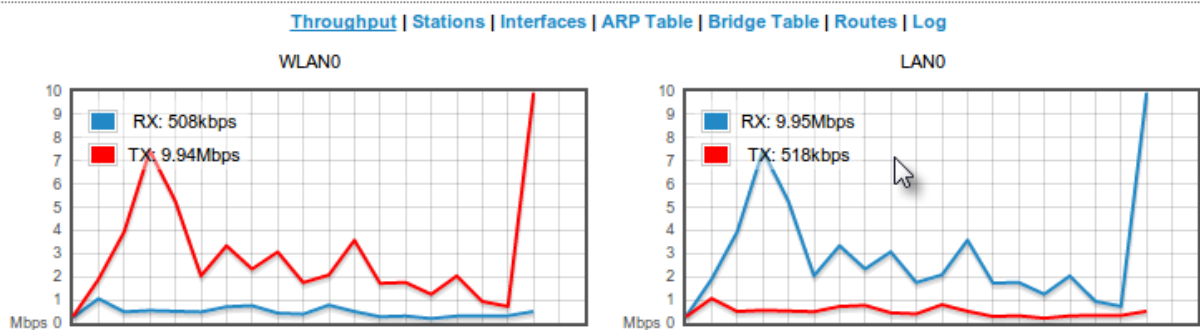


Рисунок В.2 — Окно программы AirView Spectrum Analyzer: Скорость передачи данных по каналу связи от БС к ТД в эксперименте № 2

## Приложение Г

### Графическое представление расчетов в программной среде MathCAD

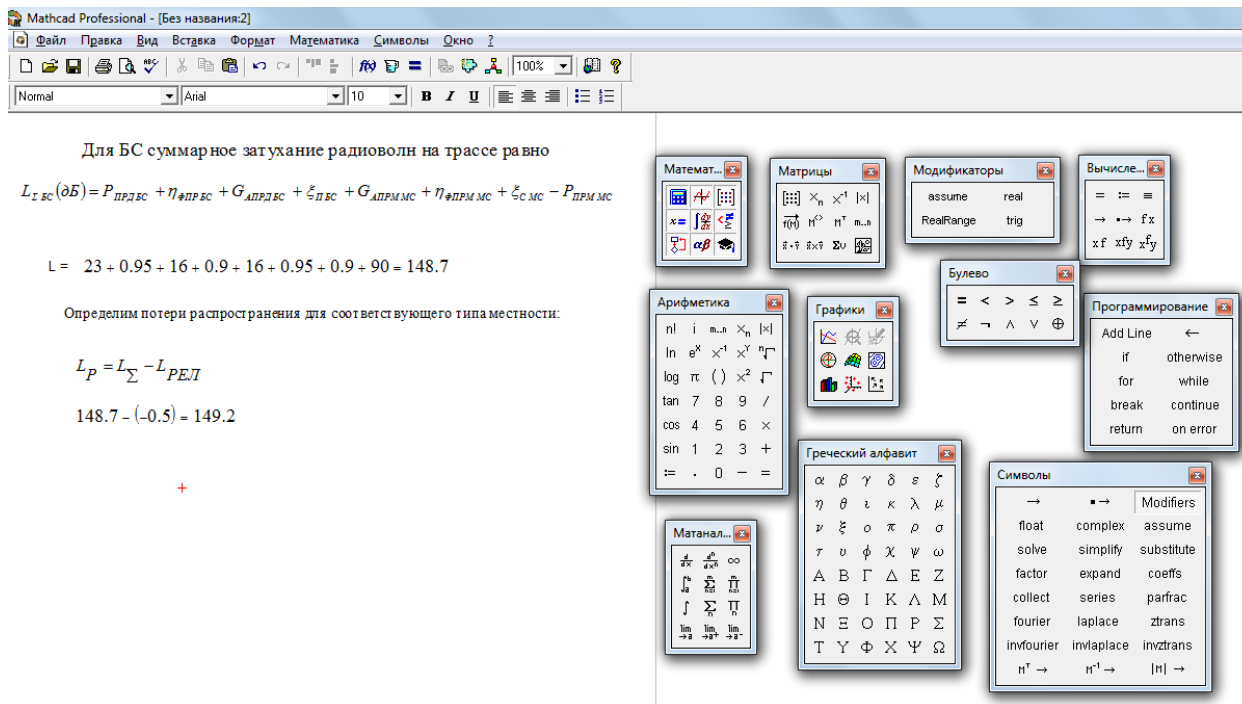


Рисунок Г.1 – Окно программы MathCAD: расчет потерь при распространении радиоволн



## Продолжение приложения Г

**Модель Окумура и Хата**

$$\alpha(h_m) = 3,2 \cdot \left[ \lg(11,75 \cdot h_m) \right]^2 - 4,97$$

$$3,2 \cdot (\lg(11,75 \cdot 27))^2 - 4,97 = 15,052$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f_0) - 13,82 \cdot \lg(h_b) - \alpha(h_m)$$

$$69,55 + 26,16 \cdot \lg(5340) - 13,82 \cdot \lg(100) - 15,05 = 124,372$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_b)$$

$$44,9 - 6,55 \cdot \lg(100) = 31,8$$

$$L_p = A + B \cdot \lg(r)$$

$$r = 10^{\frac{L_p - A}{B}} = 10^{\frac{(149,2 - 124,37)}{31,8}} = 6,037$$

Рисунок Г.2 – Окно программы MathCAD: расчет дальности связи по модели Окумура и Хата