

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**  
**Некоммерческое акционерное общество**  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**  
**имени Гумарбека Даукеева**

Кафедра «Телекоммуникационные сети и системы»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Зав. кафедрой  
PhD, доцент Темырканова Э.К.  
(ученая степень, звание, ФИО)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: «Исследование электромагнитной обстановки в г. Алматы в различных частотных диапазонах»

Магистрант: Ползик Е.В. \_\_\_\_\_ группа МРЭТн 18-2  
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель: PhD, доцент \_\_\_\_\_ Данько Е.Т.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ PhD, доцент \_\_\_\_\_ Данько Е.Т.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтроль: PhD, доцент \_\_\_\_\_ Данько Е.Т.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы 2020

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**  
**Некоммерческое акционерное общество**  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**  
**имени Гумарбека Даукеева**

Институт Космической Инженерии и Телекоммуникаций

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные сети и системы»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту: Ползик Елене Владимировне  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации: «Исследование электромагнитной обстановки в г. Алматы в различных частотных диапазонах»

Утверждена приказом по университету № 122 от «\_25\_» октября 2018г.

Срок сдачи законченной диссертации «25»\_мая 2020г.

Цель диссертации состоит в экспериментальном исследовании уровня мощности электромагнитного поля в различных районах г.Алматы и сравнение измеренных значений с допустимыми нормами.

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

1. Основные положения о радиочастотном ресурсе
2. Загруженность радиочастотного ресурса в Казахстане
3. Построение системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса
4. Расчет электро-магнитных полей от наземных радиовещательных передающих систем работающих в любых полосах частот
5. Измерения на частотах от 50 до 90 МГц
6. Измерение радиочастотного спектра в диапазоне 2300-2400 МГц на предмет занятости в городе Алматы
7. Анализ полученных результатов

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Рисунок 1.2 - Значения несущих частот для полос частот, выделенных мобильным сетям

Рисунок 2.1 – Виды радиоизлучений, определяющих загруженность радиочастотного ресурса

Рисунок 3.1 – Колебания уровня мощности сигнала в течении суток на частоте 50МГц

Рисунок 3.3– Колебания среднего за 16 суток измерений на частоте 50МГц и линия тренда

Рисунок 3.7- Колебания средних значений уровня мощности за 16 дней на разных частотах

Рисунок 3.20– Спектрограмма сигнала в точке 2

Рисунок 3.34– Спектрограмма на частотах 2318-2338,4 МГц

Рекомендуемая основная литература

1. Приказ и.о. Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 21 января 2015 года № 34. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 15 апреля 2015 года № 10730. Об утверждении таблицы распределения полос частот между радиослужбами Республики Казахстан в диапазоне частот от 3 кГц до 400 ГГц для радиоэлектронных средств всех назначений.

2. Белашов В.Ю., Асадуллин А.И. Мобильный экспериментальный комплекс для исследования электромагнитных полей естественных и искусственных источников в диапазоне 5 кГц 3 ГГц //Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». Иркутск, — 2014

3. РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R BS.1698 Оценка полей от наземных радиовещательных передающих систем, работающих в любых полосах частот, для определения воздействия неионизирующего излучения (Вопрос МСЭ-R 50/6)

4. Rafa Pawlak, Piotr Krawiec , and Juerzy Urek. On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology IEEE Access, Volume 7, 2019.

5. Биржан Е. Некоторые аспекты радиочастотного обеспечения технологии 5G (ИМТ-2020) в Республике Казахстан. Сборник Научных трудов Энергетика, радиотехника, электроника и связь, АУЭС 2017.

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

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1. Обзор литературы согласно теме	05.01.2020	
2. Сбор информации о загруженности радиочастотного ресурса в Казахстане	15.01.2020	
3. Построение системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса	20.02.2020	
4. Моделирование электромагнитной обстановки в программе SEAMCAT	18.03.2020	
5. Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных	20.05.2020	

Дата выдачи задания\_ 25 сентября 2018г. \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ (Темырканова Э.К.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Научный  
руководитель диссертации \_\_\_\_\_ (Данько Е.Т.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению  
магистрант \_\_\_\_\_ (Ползик Е.В.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

## **Аңдатпа**

Бұл жұмыс электрондық компоненттердің сипаттамаларының жиіліктік-шектеулі модельдеріне негізделген Алматы қаласындағы электромагниттік ортаны бағалау әдістері мен алгоритмдеріне, сонымен қатар практикалық мәліметтерді теориялық есептеу мен талдауға қажетті аппараттық-бағдарламалық қамтамасыз етуді қолдануға арналған.

Жұмыстың эксперименттік бөлігінде электромагниттік өрістер Барс көпканалды спектрлі анализатордың көмегімен өлшенеді. Нәтижелерге талдау STATISTICA бағдарламасында жүргізілді.

Сигнал қуатының мәндері қолайлы мәндер шегінде екендігі атап өтілді.

## **Аннотация**

Данная работа посвящена методам и алгоритмам оценки электромагнитной обстановки в городе Алматы, основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик радиоэлектронных средств, а также использование аппаратных и программных средств, необходимых для теоретического расчета и анализа практических данных.

В экспериментальной части работы проводятся измерения электромагнитных полей, с помощью многоканального анализатора спектра «Барс». Анализ полученных результатов выполнен в программе STATISTICA.

Отмечается, что значения мощности сигналов лежат в пределах допустимых значений.

## **Annotation**

This work is devoted to methods and algorithms for assessing the electromagnetic environment in the city of Almaty, based on frequency-limited models of the characteristics of electronic equipment, as well as the use of hardware and software tools necessary for theoretical calculation and analysis of practical data.

In the experimental part of the work, electromagnetic fields are measured using the Bars multichannel spectrum analyzer. The analysis of the results was performed in the STATISTICA program.

It is noted that the signal power values are within acceptable values.

## Содержание

Введение	7
1 Основные положения о радиочастотном ресурсе	9
1.1 Загруженность радиочастотного ресурса в Казахстане	10
1.2 Частоты выделенные мобильным операторам в городе Алматы	11
1.3 Частотные ресурсы для сетей 5G	14
2 Построения системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса	16
2.1 Методики расчета электро-магнитных полей от наземных радиовещательных передающих систем работающих в любых полосах частот	18
2.2 Проблема обеспечения радиочастотным ресурсом новых радиотехнологий	22
3 Методика проведения эксперимента	36
4 Результаты эксперимента	41
4.1 Измерения на частотах от 50 до 90 МГц	42
4.2 Измерение радиочастотного спектра в диапазоне 2300-2400 МГц на предмет занятости в городе Алматы	54
Заключение	66
Список литературы	67

## Введение

Радиочастотный спектр является важным ограниченным природным ресурсом, который принадлежит государству. Задача создания системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса является важной задачей. Для развития и оптимизации отрасли телекоммуникации и связи требуется эффективное использование радиочастотного ресурса, его перераспределение между устаревшими и новыми вводимыми системами радиосвязи. Выделение радиочастотного спектра в свете развития современных технологий телекоммуникации и связи является проблемным вопросом.

Исследования затрагивают проблему нехватки радиочастотного ресурса, имеющую актуальный характер т.к. создание и внедрение новых технологий в телекоммуникации для оказания качественных услуг требуют новых частотных присвоений.

Развитие технологии радиосвязи требуют увеличения пропускной способности систем, что требует больших частотных ресурсов. Один из путей решения проблемы, освоение высокочастотных диапазонов недоступных ранее, вследствие технических ограничений конструирования радиоэлектронных средств. Второй путь – анализ электромагнитной обстановки, для возможности определения перспективных частотных диапазонов, менее загруженных в настоящий момент. Исследования в данной работе будут посвящены решению вопроса анализа электромагнитной обстановки в городе Алматы.

Важно также оценить минимально необходимые объемы радиочастотного ресурса для развивающихся сетей, тенденции использования радиочастотного ресурса и требований к системам контроля радиоэфира.

Разработка программного обеспечения системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса, визуализация результатов измерений для лучшего восприятия и анализа одно из направлений работы.

Вторая проблема возникающая в условиях ограниченного частотного ресурса и постоянного увеличения числа одновременно функционирующих радиоэлектронных средств (РЭС) на одной территории это создание мешающего электромагнитного влияния систем друг на друга. Это приводит к сбоям в работе систем передачи информации и других радиотехнических систем.

Таким образом, возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) группировки РЭС, решение которой представляет собой решение задачи оценки и задачи обеспечения ЭМС. При этом информационной основой для разработки мер по обеспечению ЭМС являются результаты оценки ЭМС.

Повышение требований к функциональной безопасности систем связи и передачи данных в отношении непреднамеренных электромагнитных помех

(НЭМП) приводит к необходимости совершенствования существующих методов и моделей расчёта и прогнозирования условий ЭМС. Решение задачи оценки ЭМС базируется на использовании множества моделей, отражающих физические процессы функционирования и взаимного влияния РЭС. Повышение уровня ЭМС систем связи и передачи информации возможно на основе более детального учёта факторов, обуславливающих формирование электромагнитной обстановки (ЭМО) в точке приёма, приближенной к фактической ЭМО, и оценки воздействия данной ЭМО на функционирование РЭС.

Данная работа посвящена методам и алгоритмам оценки ЭМО в городе Алматы основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС, а также аппаратным и программным средствам, которые необходимы для её проведения. Таким образом, задача разработки новых и совершенствования существующих методов и алгоритмов оценки ЭМО, является актуальной.

## 1. Основные положения о радиочастотном ресурсе

Радиочастотный ресурс – это ограниченный природный ресурс, и его целесообразное использование имеет важное значение.

Радиочастотный ресурс – это радиочастотные электромагнитные сигналы и поля, цель создания которых передача и приема информации. Основные признаки радиочастотного ресурса:

- частота электромагнитных полей (полоса частот);
- время их существования;
- трехмерное пространство распространения полей с соответствующей энергией.

В пределах трехмерного пространства поля распространяются во времени с определенной частотой и энергией, что регистрируются соответствующими специальными приборами.

Второстепенными признаками полей радиочастотного ресурса являются поляризация поля, модуляция, направленность распространения поля и другие.

Без соответствующего радиоконтроля невозможно осуществить управление радиочастотным ресурсом. В реальных условиях санкционированного применения радиоэлектронных средств невозможно гарантировать достижение запланированных результатов. Это вызвано тем, что невозможно учесть все особенности радиоэлектронного оборудования и возможных взаимных влияний.

Радиоконтроль становится выполнимым только при наличии радиоизмерительного оборудования, осуществляющего необходимые измерения с требуемой точностью [1].

Эффективность использования радиочастотного ресурса как числовой показатель является критерием степени использования, когда применяемое радиоэлектронное оборудование отвечает условиям обеспечения электромагнитной совместимости.

Радиочастотный ресурс носит ограниченный характер, поэтому для его распределения по радиослужбам в мировом масштабе заключены международные соглашения. В принятые международные документы систематически Международным союзом электросвязи вносятся изменения, позволяющие развивать новые технологии.

В масштабе страны распределение и контроль за использованием радиочастотного ресурса возлагается на государственные органы.

Отсюда можно сделать вывод, что радиочастотный спектр является физическим понятием. Государство управляет распределением спектра, поэтому радиочастотный ресурс является технико-экономическим понятием.

Проблема: электромагнитная совместимость существующих радиосистем и выделение частотных диапазонов при введении новых систем.

На конкретной территории электромагнитные поля различного диапазона частот в совокупности формируют электромагнитную обстановку. Её изучение является обязательным при инженерно-экологических изысканиях под строительство, при аттестации рабочих мест, при составлении санитарно-гигиенических паспортов зданий по электромагнитной безопасности [2]. Исследования проводят расчётными методами, либо путём измерения нормируемых параметров: напряжённости электрической и магнитной составляющих ЭМП, плотности потока энергии.

Наблюдаются как уровни высокочастотных электромагнитных полей, создаваемых радиопередающими устройствами, так и низкочастотных полей, источниками которых являются линии электропередач, электротранспорт, бытовые приборы и другие источники. Исследования техногенных ЭМП приурочены к городским территориям. Процесс урбанизации связан с развитием телекоммуникационных сетей, с ростом класса напряжения электросетей, плотности размещения распределительных сетей, дальности электропередач, что в свою очередь приводит к усилению воздействия ЭМП на человека и окружающую среду.

Большое количество публикаций посвящено влиянию электромагнитного поля на здоровье людей и окружающую среду в России. Анализу электромагнитной обстановки уделяется внимание во многих регионах, рассматривается широкий спектр оборудования и программного обеспечения для проведения исследований в этом направлении. В России измерения проводятся с использованием отечественных разработок например, программного комплекса анализа электромагнитной обстановки (ПК АЭМО), разработанного Самарским отраслевым НИИ Радио, аппаратно-программного комплекса «ПРИЗНАК-10М» [3,4].

Исследования, освещенные в статьях авторов дальнего зарубежья, проводятся на базе оборудования известных производителей, таких как Rohde&Schwarz, Aaronia AG, Германия и другое [5,6,7].

При этом авторы отмечают схожие проблемы: несовершенство измерительных приборов и сложность рельефа местности, множество факторов, влияющих на уровень поля в конкретной зоне и как следствие, расхождение результатов реальных измерений со значениями, полученными путем моделирования на основе различных методик.

В Республике Казахстан этой проблеме уделяется пристальное внимание. Особенно сейчас, когда внедрение новых технологий в мобильной связи требует использования широкополосных систем передачи для увеличения пропускной способности. При внедрении новых систем изменится электромагнитная обстановка и уже сейчас важно её как со стороны влияния на окружающую среду и здоровье людей, так и влияния на электромагнитную совместимость с существующими радиосистемами.

## 1.1 Загруженность радиочастотного ресурса в Казахстане

Анализ загруженности радиочастотного ресурса в Казахстане показывает следующее:

- распределения и использования радиочастотного ресурса для удовлетворения нужд правительственных служб составляет около 90% от общего количества;
- доступность для гражданского пользования составляет порядка 10%; влияние недостатка радиочастотного ресурса на развитие тех
- негативное влияние связи и телекоммуникаций.

Пути решения вышеуказанных проблемных вопросов:

- разработка плана по модернизации национальной таблицы распределения частот;
- сближение радиочастотного ресурса с европейскими аналогами;
- создание условий для интенсивного развития современных технологий в области связи и телекоммуникаций;
- применение механизма конверсии.

Конверсия – это процесс постепенного и поэтапного высвобождения полос радиочастотного спектра правительственного назначения в пользу гражданского.

Конверсия способствует решению следующих задач:

- дальнейшее развитие рынка технологий радиосвязи;
- обязательный учет потребностей национальной обороны и безопасности государства;
- способствование развитию оборонной промышленности и технологий связи в равной степени;
- модернизация действующих и разработка новых радиоэлектронных средств и технологий;
- эффективное использование радиочастотного спектра;
- улучшение технических параметров радиоэлектронных средств;
- анализ действующих радиоэлектронных средств и работающих технологий.

Проблемные ситуации возникающие в процессе конверсии:

- процесс высвобождения полос радиочастотного спектра носит трудоемкий и затратный характер;
- возникновение потерь и затрат и их возмещения при перераспределении радиочастотного ресурса;
- операторы связи обязаны ежегодно осуществлять платежи в бюджет;
- осуществление разовых платежей за возможность оказания услуг;
- риск несвоевременного возврата средств потраченных на конверсию.

## 1.2 Частоты выделенные мобильным операторам в городе Алматы

Приведенные выше заключения о быстром развитии мобильных систем радиосвязи свидетельствуют следующие данные, опубликованные статистическими агентствами.

С 2017 года по 2018 год количество абонентов сотовой связи с доступом в интернет выросло на 18% (Рисунок 2.1). И эта тенденция продолжает развиваться.

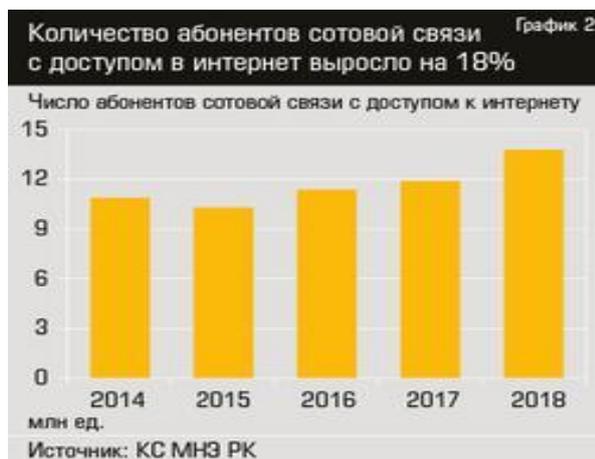


Рисунок 1.1- Данные о количестве абонентов сотовой связи с доступом в Интернет в РК

Развертывание сетей нового поколения 4G, LTE, LTE Advanced идет в стране очень быстро. “Сеть «Kcell» за 2018 год внедрена в 25 городах Казахстана: в г. Капчагай, Текели, Есик, Каскелен, Жаркент, Степногорск, Атбасар, Щучинск, Кандыагаш, Шалкар, Аягоз, Зыряновск, Зайсан, Сарань, Шахтинск, Форт-Шевченко, Аксай, Шу, Жанатас, Аральск, Казалинск, Арысь, Сарыагаш, Ленгер, Жетысай” по сообщениям из официальных источников.

В отчете компании за 2,5 года 4G/LTE сеть «Kcell» стала доступна в 57 городах, а в 17 - развернута сеть 4G+/LTE Advanced. Главной особенностью LTE-Advanced является объединение частотных диапазонов 1800 МГц и 800 МГц, что позволяет достигать требуемой скорости передачи данных, в зависимости от количества и ширины объединенных частот, до двух раз выше, чем в сетях 4G/LTE.

В Алматы работает 4 крупных оператора сотовых сетей связи. Согласно законодательства Республики Казахстан, операторам выделены частотные диапазоны, представленные в таблице 1.1.

Кроме того в городе начали работу сети LTE. Частоты, используемые в этом стандарте представлены ниже.

В режиме LTE (4G) рабочая частота определяется также по band (полосе). Возможные варианты:

Band 1 – 2100 МГц;  
 Band 3 – 1800 МГц;  
 Band 7 – 2600 МГц;  
 Band 20 – 800 МГц;  
 Band 38 – 2600 МГц.

Таблица 1.1- Частотные диапазоны

	2G	3G	4G LTE
Altel	900 МГц	850 МГц, 900 МГц (БС Tele2)	1800 МГц - band3
Beeline	900 МГц	2100 МГц	Алматы и Шымкент - 800 МГц (Band 20) и 1800 МГц (band 3); в пилотных зонах г.Алматы на частоте 2100 МГц (band 1)
Kcell	900 МГц	2100 МГц	Алматы и Шымкент - 800 МГц (Band 20) и 1800 МГц (band 3); в пилотных зонах на частоте 2100 МГц (band 1)
Tele2	900 МГц	900 МГц, 850 МГц (БС Altel)	1800 МГц - band3 (базовые станции АЛТЕЛ)

Номинальные значения частот несущих для различных полос представлены на рисунке 1.2.

На данный момент в Казахстане используются band 3 и 20 (в пилотных зонах в Алматы возможно использование band 1).

Глобальное распределение частотных ресурсов между технологиями согласно Международным стандартам, утвержденным Международным союзом электросвязи (ITU), приведено на рисунке 1.3.

Из рисунка 1.2 видно, что сети связи, основанные на технологии LTE, могут работать в большем количестве частотных диапазонов, чем другие сети мобильной связи.

### 1.3 Частотные ресурсы для сетей 5G

Функционирование сетей 5G предполагает возможность использования различных участков частотного ресурса, как низких, так и высоких частотных диапазонов. один из возможных вариантов использование диапазона до 6 ГГц, но возникает проблема с наличием свободных частот так как диапазон 5 ГГц выделен Wi-Fi системам. Поэтому не исключается вариант отведение для технологий 5G частот в диапазоне гигагерц.

Номер диапазона	Линия «вверх» (UL) (приемник БС / передатчик МС)	Линия «вниз» (DL) (передатчик БС / приемник МС)	Режим
1	1920...1980	2110...2170	FDD
2	1850...1910	1930...1990	FDD
3	1710...1785	1805...1880	FDD
4	1710...1755	2110...2155	FDD
5	824...849	869...894	FDD
6	830...840	865...875	FDD
7	2500...2570	2620...2690	FDD
8	880...915	925...960	FDD
9	1749,9...1784,9	1844,9...1879,9	FDD
10	1710...1770	2110...2170	FDD
11	1427,9...1447,9	1475,9...1495,9	FDD
12	698...716	728...746	FDD
13	777...787	746...756	FDD
14	788...798	758...768	FDD
15	Зарезервирован	Зарезервирован	-
16	Зарезервирован	Зарезервирован	-
17	704...716	734...746	FDD
18	815...830	860...875	FDD
19	830...845	875...890	FDD
20	832...862	791...821	FDD
21	1447,9...1462,9	1495,9...1510,9	FDD
22	3410...3500	3510...3600	FDD
...	...	...	...
33		1900...1920	TDD
34		2010...2025	TDD
35		1850...1910	TDD
36		1930...1990	TDD
37		1910...1930	TDD
38		2570...2620	TDD
39		1880...1920	TDD
40		2300...2400	TDD
41		3400...3600	TDD

Примечание. Частотные диапазоны в таблице могут быть изменены по результатам исследований 3GPP и ITU-R

← FDD/TDD

← FDD/TDD

Рисунок 1.2 – Значения несущих частот для полос частот, выделенных мобильным сетям

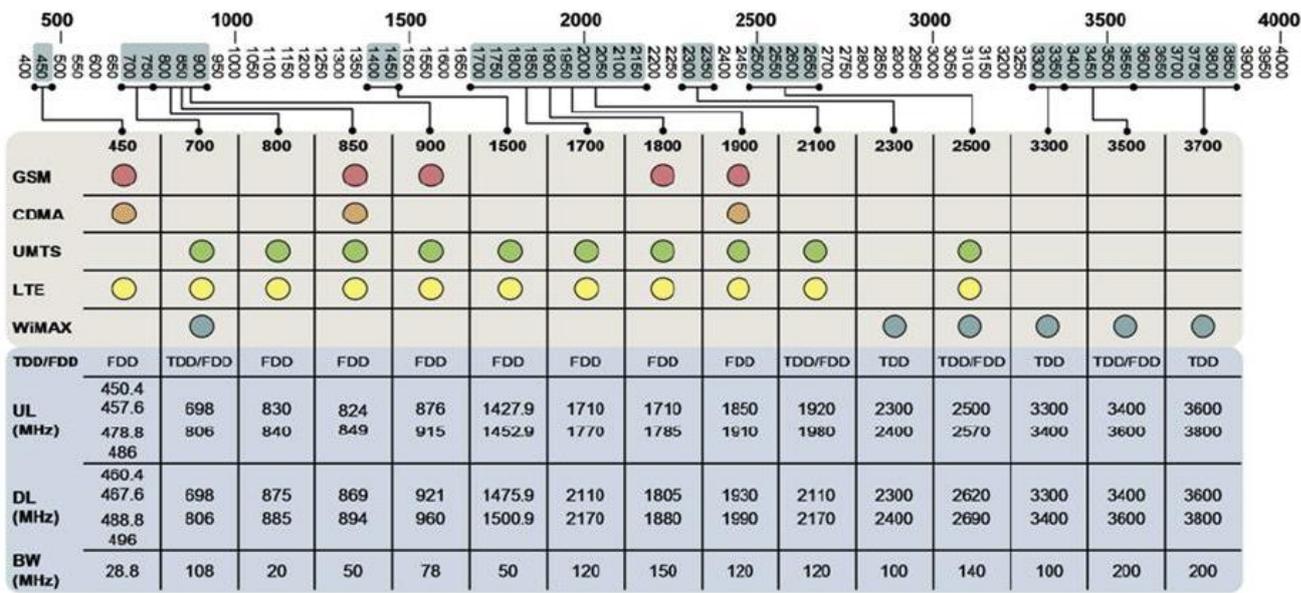


Рисунок 1.3 - Распределение частотных ресурсов между технологиями беспроводной связи

Высокочастотные диапазоны не являются классическим участком для работы сетей мобильной связи, их внедрение потребует разработки качественно новых сетевых и архитектурных решений. Возможны, два сценария развития 5G предполагается использование новых частот или внедрять на используемых частотах, продолжая свою работу параллельно со сетями 3G и/или 4G. При выборе второго сценария 5G не сможет быстро вытеснить 3G и/или 4G, но операторам легче будет финансировать переходный этап.

Кроме этого применение низких частот в сетях 5G имеет ряд преимуществ. Низкочастотный спектр до 6 ГГц уже согласован под нужды 5G на завершившейся Всемирной конференции радиосвязи (ВКР) 2015 года. Участь высоких частот определяют на ВКР-19 в 2019 году.

Формирование оптимального покрытия без излишних вложений в развитие инфраструктуры для сетей пятого поколения одно из преимуществ низкочастотных участков спектра.

Обеспечиваемое покрытие низкими частотами хорошее проникновение радиосвязи в помещения, что является важным фактором для работы IoT-объектов. Особенно актуально это для систем связи M2M, «умного» города и «умных» домов здесь рассматривается диапазон 700 МГц.

Низкие диапазоны применительно к 5G также актуальны в целях подключения различных, нуждающихся в надежной сети устройств, таких как, самоуправляемые автомобили предлагается применить диапазоны 700 МГц и 3,4-3,8 ГГц. На этих диапазонах можно реализовывать чувствительные к задержкам сервисы и автоматизировать промышленность.

Частотный ресурс ниже 1 ГГц отличается хорошим покрытием при одновременно небольших затратах на строительство сетевых объектов. Это является оптимальным решением для приложений, которые не требовательны к высокой скорости передачи данных. Умные счетчики, датчики и другие подобные устройства из сегмента Интернета вещей имеющие хорошее покрытие и не требующие больших затрат на строительство новых сетевых объектов - оптимальное решение.

На рисунке 1.4 представлены потребности развития сетей 5G в различных диапазонах частот с учетом ширины предоставляемого канала передачи.

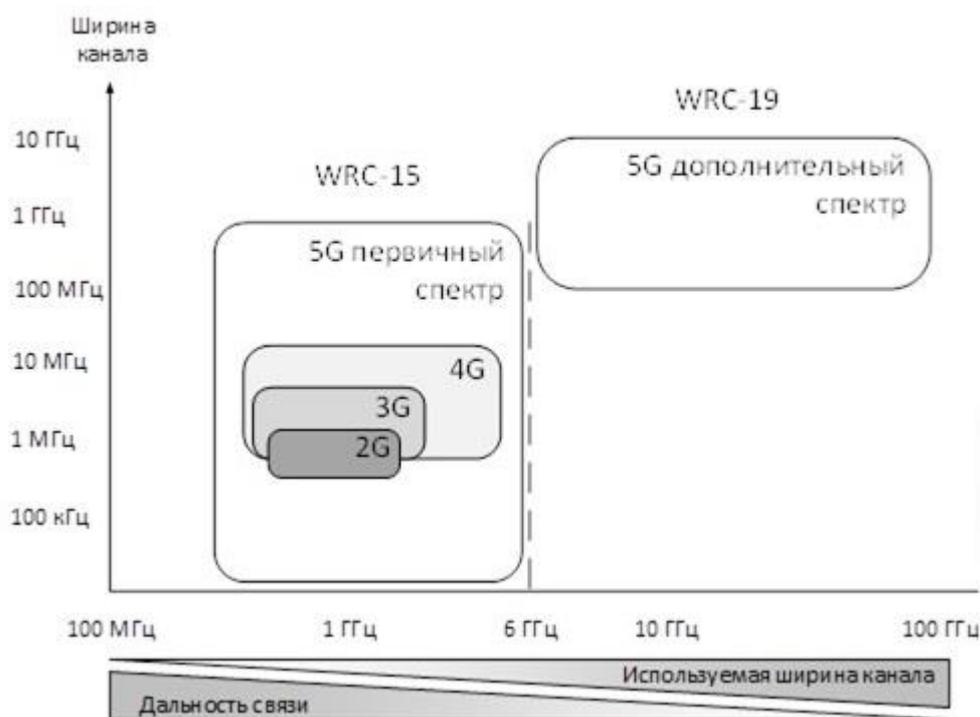


Рисунок 1.4 – Потребность сетей 5G в частотном ресурсе

Анализируя вышесказанное, измерения занятости частотного спектра будут проводиться в диапазоне близком к используемому, существующими сетями мобильной связи.

## 2 Построения системы сбора информации о загруженности радиочастотного ресурса

Загруженность радиочастотного ресурса подразумевает показатель использования радиочастотного спектра, которая характеризует плотность заполнения конкретного участка радиоизлучениями для ведения радиопередачи. Помимо этого, загруженность радиочастотного ресурса определяет нежелательные радиоизлучения, которые создают индустриальные и контактные радиопомехи и естественного происхождения.

Радиоизлучения обуславливают загруженность радиочастотного ресурса и формируют электромагнитную обстановку в зонах функционирования объектов связи, т.е. создается так называемая электромагнитная совместимость.

Особенности загруженности радиочастотного ресурса:

- по диапазонам частот имеют различные значения, особенно в метровых и дециметровых диапазонах волн;
- влияние развития систем подвижной радиосвязи;
- увеличение числа пользователей систем подвижной радиосвязи;
- широкое использование электротехнического и высокочастотного оборудования;



Рисунок 2.1 – Виды радиоизлучений, определяющих загруженность радиочастотного ресурса

- появление промышленных и контактных помех в условиях городов и промышленных центров;
- уровень напряженности поля фоновой составляющей загрузки в некоторых районах достигают  $15\div 20$  мкВ/м и более;
- чувствительность современных приемников, характеризующие минимальные уровни принимаемых сигналов, при пересчете к приемной антенне исчисляется единицами и даже долями мкВ/м.

Исследование структуры, пространственно-временных и спектральных характеристик электромагнитных полей и помех, генерируемых как естественными их источниками (процессы в ионосфере и магнитосфере Земли и пр.), так искусственными излучателями (радио- и электротехнические комплексы, элементы электроэнергетических систем (ЭЭС) и т. п.) важно как при изучении фундаментальных проблем радиофизики и физики околоземного пространства, так и при решении вопросов электромагнитной совместимости радио- и электротехнических устройств. Существует большое количество аналитических и численных

методов расчета ЭМ полей, но все они нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Вопрос комплектации, технических характеристик и выполняемых функций комплексов измерения электромагнитных полей с целью обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств описано в соответствующих Рекомендациях МСЭ. Они жестко регламентированы, так как на этих измерениях основываются выводы о соблюдении требований по использованию частотного ресурса, который является платным для основных пользователей.

Существует большое число публикаций, посвященных анализу электромагнитной обстановки в регионах, городах которые оценивают ЭМО с социальной и экологической точки зрения. То есть определяя уровень поля на определенной территории, исследователи публикуют данные или собирают их в базу для акцентирования внимания на проблемах загрязнения окружающей среды, угрозы здоровью людей или рассматривают технические сложности внедрения новых систем радиосвязи с точки зрения ЭМС [9].

Такие измерения проводятся различными техническими средствами. Так в публикации «Проблемы изучения электромагнитной обстановки в городах России» авторы Гапонов Д.А и Курилова А.Э. выделяют четыре вида мониторинга:

- электромагнитный мониторинг для оценки санитарно-гигиенического состояния окружающей среды,
- геоэкологический электромагнитный мониторинг,
- социально ориентированный электромагнитный мониторинг,
- оперативный электромагнитный мониторинг.

Обзор проводимых в России исследований в данном направлении, позволили выделить общие проблемы в этом вопросе.

Используется широкий спектр оборудования и программного обеспечения для проведения исследований в ЭМО. В России измерения проводятся с использованием отечественных разработок например, программного комплекса анализа электромагнитной обстановки (ПК АЭМО), разработанного Самарским отраслевым НИИ Радио, аппаратно-программного комплекса «ПРИЗНАК-10М», ИКАР-2 и других. [3,4].

Исследования, освещенные в статьях авторов дальнего зарубежья, проводятся как правило на базе оборудования известных производителей, таких как Rohde&Schwarz, Aaronia AG, Германия и другое [5,6,7].

При этом авторы отмечают схожие проблемы: высокая цена измерительных приборов, сложность учета рельефа местности, множество факторов, влияющих на уровень поля в конкретной зоне и как следствие, расхождение результатов реальных измерений со значениями, полученными путем моделирования на основе различных методик.

## 2.1 Методики расчета электро-магнитных полей от наземных радиовещательных передающих систем работающих в любых полосах частот

Расчет электро-магнитных полей от наземных радиовещательных передающих систем проводится согласно Рекомендации МСЭ-R BS.1698.

Согласно Рекомендации МСЭ-R BS.1698 проводится расчет мощности электромагнитных полей на расстоянии от передающих радиоустройств.

Электромагнитное поле, распространяющееся от передающей антенны, содержит различные компоненты: электрическое и магнитное поля, которые убывают с расстоянием  $r$  от передатчика. Важные компоненты:

- поле дальней зоны (поле Фраунгофера), также называемое полем излучения, в котором величина полей уменьшается со скоростью  $1 / r$ ;
- излучающее ближнее поле (Френеля), также называемое индуктивным полем. Структура поля индуктивного поля сильно зависит от формы, размера и типа антенны, хотя были установлены различные критерии, которые обычно используются для определения этого поведения;
- реактивное ближнее поле (Рэлея), также называемое квазистатическим полем, которое уменьшается со скоростью  $1 / r^3$ .

Поскольку индуктивные и квазистатические компоненты быстро ослабевают с увеличивающимся расстоянием от источника излучения, они являются значащими только вблизи передающей антенны – в так называемой ближней зоне.

Поле излучения, с другой стороны, является главным элементом в так называемой дальней зоне. Оно является полем излучения, которое эффективно переносит сигнал радио или телевидения от передатчика к удаленному приемнику.

В дальней зоне электромагнитное поле представляется плоской волной.

Границы дальнего поля определяются условием  $r > 2D^2/\lambda$ , где  $D$  максимальный размер антенны.

Существует ряд ограничений применения этого условия к антеннам радиовещания:

- условие выведено из соображений, оплоских антеннах;
- предполагается, что  $D$  намного больше  $\lambda$ .

Если эти условия не выполняются, то поля в дальней зоне следует использовать расстояния более  $10\lambda$ .

Вектор плотности мощности электромагнитного поля, вектор  $S$  Пойнтинга (Poynting), дается векторным произведением электрического,  $E$ , и магнитного,  $H$ , компонентов полей:

$$S = E \times H . \quad (2.1)$$

Выражение может быть упрощено в идеальных условиях. без учета препятствий и влияния земной поверхности. Отношение амплитуд напряженностей электрического,  $E$ , и магнитного,  $H$ , полей является константой,  $Z_0$ , которая известна как характеристический импеданс свободного пространства, и составляет порядка 377 Ом (или  $120\pi$  Ом).

Следовательно, плотность мощности в поле дальней зоны, при свободном распространении запишется уравнением:

$$S = E^2/Z_0 = H^2 Z_0 \quad (2.2)$$

Плотность мощности – в зависимости от расстояния в дальней зоне может быть вычислена, по уравнению:

$$S = P \cdot G_i / (4\pi r^2), \quad (2.3)$$

где  $S$  - плотность мощности (Вт/м<sup>2</sup>);

$P$  - мощность (Вт), подаваемая к источнику излучения, в системе без потерь;

$G_i$  - коэффициент усиления антенны в заданном направлении;

$r$  - расстояние от источника излучения(м).

При расчете плотности мощности в других направлениях необходимо учитывать диаграмму направленности антенны.

Учет конструкции антенны вводится коэффициентом  $G_a$ , характеризующий усиление антенны относительно эталонной антенны изотропного усиления  $G_r$ , такие как полуволновой симметричный вибратор или короткий несимметричный вибратор, коэффициент усиления  $G_i$  должен быть заменен произведением  $G_r \cdot G_a$ . Коэффициент  $G_r$  приводится в таблице 1.2.

$$S = P \cdot G_r \cdot G_a / (4\pi r^2) \quad (2.4)$$

Таблица 1.2 - Коэффициенты изотропного усиления для различных типов эталонных антенн

Тип эталонной антенны	Коэффициент изотропного усиления, $G_r$	Типовые приложения, где тип эталонной антенны является значимым
Изотропный излучатель	1,0	Радар, система спутниковой и наземной радиолинии
Полуволновой симметричный вибратор	1,64	Телевидение, радиовещание ОВЧ и

		иногда ВЧ
Короткий несимметричный вибратор	3,0	Радиовещание НЧ, СЧ и иногда ВЧ

Усиление антенны  $G_d$  ( $G_a = G_d$ ) относительно усиления полуволнового симметричного вибратора выразится следующим образом:

$$S = 1,64 \cdot P \cdot G_d / (4\pi r^2), \quad (2.5)$$

где:

$G_d$  : усиление антенны относительно полуволнового симметричного вибратора.

Подобным образом, когда усиление антенны  $G_a = G_m$  выражается относительно усиления короткого несимметричного вибратора:

$$S = 3,0 \cdot P \cdot G_m / (4\pi \cdot r^2), \quad (2.6)$$

где:  $G_m$ -усиление антенны относительно короткого несимметричного вибратора.

Напряженность электрического поля в дальней зоне можно выразить введя коэффициент  $C$ , учитывающий характеристику направленности антенны и исключив  $S$ :

$$E = \sqrt{\frac{Z_0 \sqrt{PG_i}}{4\pi r}} C = \frac{c}{r} \sqrt{30PG_i} \quad (2.7)$$

$E$  - напряженность электрического поля (В/м)

$Z_0 = 377$  Ом, характеристический импеданс свободного пространства;

$P$  - мощность, подаваемая к источнику излучения (Вт), в в системе без потерь;

$C$  - коэффициент ( $0 \leq C \leq 1$ ), учитывающий характеристику направленности антенны (в основном направлении излучения,  $C = 1$ ).

Поле от электромагнитного излучателя можно вычислить аналитическими и численными методами. Вычисления позволяют оценить уровень напряженности полей в случае определенного воздействия, чтобы определить, требуются ли измерения, и какое оборудование надо использовать. Вычисления позволяют обосновать результаты измерений и прогнозировать дальнейшее развитие ситуации.

В некоторых случаях, например для сложных ситуаций воздействий поля в ближней зоне, дорогое измерительное оборудование SAR не доступно, вычисления способны заменить измерения.

От используемых численных и аналитических методов зависит точность и качество вычислений, кроме того важна точность описания электромагнитного источника (источников), а также от физических

объектов между передатчиком и приемником, которые могут затронуть поля. Для вычислений степени SAR на качество результата будет оказывать влияние также точность основной модели.

Для проведения вычислений, необходимо знать или оценить исходные данные.

Исходными данными могут быть частота, средняя мощность, пиковая мощность, ширина импульса, длина импульса, скорость повторения импульсов, диаграмма направленности антенны, усиление и конфигурация.

Аналитические методы разработаны только для вычисления электромагнитных свойств ограниченного количества вариантов и конфигураций. Для решения общих случаев должны быть применены численные методы. Какой из численных методов является наиболее подходящим для определенной проблемы, зависит от рассматриваемого частотного диапазона, геометрических структур, которые подлежат моделированию, и ситуации типового воздействия (поле ближней или дальней зон).

Некоторые обычные численные методы моделирования приводятся ниже:

- физическая оптика (PO);
- физическая теория дифракции (PTD);
- геометрическая оптика (GO);
- геометрическая теория дифракции (GTD);
- однородная теория дифракции (UTD);
- метод эквивалентных токов (MEC);
- метод моментов (MOM);
- многократный многополюсный метод (MMP);
- метод конечных разностей в области времени (FDTD);
- метод конечных элементов (FEM);
- метод импеданса.

Какой из представленных методов лучше подходит для конкретной конфигурации, требуется предварительная оценка.

С помощью этих методов возможно определить амплитуду и фазу перечисленных значений электромагнитного поля, в любой точке в пространстве, когда излучающие и рассеивающие элементы могут быть идеальными проводниками, или диэлектрическими:

- напряженность электрического поля;
- напряженность магнитного поля;
- плотность мощности;
- ток;
- напряжение;
- импеданс.

Метод моментов (MOM).

Чаще всего метод моментов применяется при разработке радиовещательных антенных систем и в расчете их результирующих электромагнитных полей. Этот метод позволяет осуществлять расчеты как на передающем, так и на приемном концах, а также в полях ближней и дальней зон антенны.

Технические модели, имеющие несколько измерений, которые моделируются, на основе их материальных параметров (комплексная диэлектрическая проницаемость), а также параметров земли. Моделирование проводится с использованием проводников, в предположении, что они тонкие относительно длины волны. Ограничение этого метода в высоких требованиях к вычислительным ресурсам и времени вычислений.

Быстрое преобразование Фурье/Метод сопряженных градиентов (БПФ/CG)

Метод БПФ/CG является дальнейшим развитием метода моментов. Итеративные алгоритмы, основанные на быстром преобразовании Фурье (БПФ) и градиентной процедуре, используются для решения линейных уравнений, полученных из метода моментов.

Метод конечных разностей в области времени (FDTD). FDTD является численным методом для решения дифференциальных роторных уравнений Максвелла в области времени. Он может быть использован для вычисления внешнего и внутреннего распределения электромагнитного поля и степени SAR в биологических телах, для воздействий как поля ближней зоны, так и поля дальней зоны. В методе FDTD, становятся дискретными как время, так и пространство, а биологическое тело моделируется путем определения значений диэлектрической проницаемости и проводимости для пространственных ячеек, которые оно занимает. Требуемая память компьютера пропорциональна количеству пространственных ячеек.

Многократный многополюсный метод (MMP). Метод MMP основывается на аналитических решениях к уравнениям полей, которые обладают многополюсностью в одной точке в пространстве, и используется в сочетании с обобщенным многополюсным методом (GMP). Процедура MMP является особенно подходящей для ситуации так называемых тел “рассеивания с потерями”, которые находятся вблизи источников излучений, т. е. в пределах непосредственного поля ближней зоны.

Метод импеданса был успешно использован для решения дозиметрических проблем, где могли быть выполнены квазистатические приближения. Для вычислений степени SAR в человеческих телах этот метод оказался очень эффективным на частотах вплоть до 40 МГц. В методе импеданса биологическое тело моделируется с помощью трехмерной сети комплексных импедансов.

Большинство методов, перечисленных выше, можно использовать для вычисления уровней напряженностей полей от электромагнитных излучателей. Точность результатов сильно зависит от того, насколько хорошо моделируется излучатель (например, антенна). Если объекты около излучателя, между излучателем и точкой предсказания, или близко к точке предсказания напряженности поля значительно влияют на уровни напряженностей полей, такие объекты также следует промоделировать.

Измерение полей воздействия в частотном диапазоне 10 кГц–300 ГГц требует значительного усилия из-за изменчивости поля, подлежащего определению, в пространстве и во времени.

Необходимо использовать соответствующую измерительную аппаратуру и действенную измерительную установку. Важно знать характеристики измерительных инструментов, поскольку эти характеристики определяют соответствующий выбор инструмента. Такие зависимые от частоты характеристики, как взаимодействие кабелей, внеполосные некалиброванные характеристики и сформированная частотная характеристика, особенно важны для широкополосных инструментов.

Другие свойства полей нуждаются в согласовании с характеристиками инструментов; например, реактивный или излучающий, поляризация и модуляция, или количество источников полей.

Воздействия на людей со стороны электромагнитных полей обычно измеряются в единицах плотности мощности, но другие такие меры, как наведенный ток в теле, могут быть более значимыми, и положения являются своего рода критическими аспектами для защиты или контроля, которые инженер обязан решать. Во многих случаях нет простой математической нормы между электрическим и магнитным полями, и поэтому, в этой ситуации, должно быть измерено каждое поле.

В этом случае используемыми измерительными инструментами являются:

- инструменты для измерения значения напряженностей полей  $E$  и  $H$ ;

- инструменты для измерения тока.

Главными приборами этих инструментов являются:

- зонды;

- соединительные кабели, которые переносят сигнал от зонда к устройству чтения и вычисления;

- устройство чтения и вычисления.

Большинство зондов являются изотропными или всенаправленными в трех измерениях, чтобы измерять энергию от всех направлений.

Зонды обязаны показывать следующие характеристики:

- реагировать на намеченные поля,  $E$  или  $H$ , без отклика на непреднамеренные поля;

– в общем случае, зонд является электрически малым и менее чем  $\lambda/10$  для максимальной частоты эксплуатации; однако специальные оценивания показали, что некоторые зонды могут быть электрически большими;

– предсказуемо реагировать на такие изменения условий окружающей среды, как температура и влажность.

Очень важно, чтобы изотропные зонды, в течение измерения, помещались таким образом, чтобы соединение могло уменьшать возмущение поля в зонде соединительными кабелями. Это возмущение поля, как правило, является проблемой при измерении электрических полей средних волн или более низких частот.

Кабели, используемые для подключения зонда, а также считывающего и вычисляющего инструмента, должны быть свободны от шума и предотвращать связь поля с измерительным блоком.

Очень важно отметить, что для кабелей имеется возможность действовать в качестве антенны и изменять поле в зонде, вызывая неправильное считывание. Иногда есть возможность решать эту проблему путем установки кабелей, во время измерений, перпендикулярно по отношению к электрическому полю.

Характеристики измерительных инструментов для электрического и магнитного полей. Обычно измерения воздействия электромагнитного поля выполняются в частотной области. Имеются две принципиальные группы инструментов.

Типы и технические требования широкополосных инструментов

С помощью широкополосных инструментов можно измерять суммарное поле в заданном частотном диапазоне (т. е. в ширине полосы частот), но нет возможности различать вклад источника отдельной частоты, когда одновременно излучают несколько источников.

Широкополосные инструменты выполняются с датчиками, которые могут быть неизотропными для измерения отдельного пространственного компонента поля, или могут быть изотропными для измерения всех трех компонентов поля одновременно. Эти инструменты могут измерять суммарный уровень мгновенного электрического или магнитного поля, или среднеквадратичное значение поля, или среднее значение плотности мощности за период времени.

Типы и технические характеристики узкополосных инструментов.

Узкополосные инструменты являются избирательными по частоте и могут измерять напряженность электромагнитного поля в диапазоне различных частот. Посредством неизотропного датчика или антенны есть возможность оценивать направление и поляризацию поля. Необходимо проявлять осторожность в установке, поскольку поля могут быстро изменять высокую частоту в пространстве относительно размера антенны, особенно в присутствии таких отражающих объектов, как стены, земля,

металлические опоры и структуры. Важно заметить, что путем изменения точки измерения обнаруженная напряженность поля может быть полностью различной. На измерение могут также повлиять позиция антенны и соединяющие кабели.

Когда измерение электромагнитного поля на высокой частоте выполняется в области времени, необходимо использовать инструменты с соответствующей характеристикой анализа (для частоты и разрешающей способности ответа), чтобы получать хорошие результаты в спектральном анализе с помощью преобразования Фурье.

Система состоит из следующих основных компонентов:

- Калиброванная антенна, которая преобразует электрическое поле для дипольной антенны или магнитное поле для рамочной антенны в волну на линии передачи;
- Калиброванная соединительная линия передачи или коаксиальный кабель;
- Избирательный приемник, обычно в виде анализатора спектра, который измеряет, используя цепь настройки, принятую напряженность сигнала как функцию частоты. Анализатор спектра дает значения напряжения или мощности в области частоты.

Во время этих измерений очень важно позаботиться, чтобы измерительные инструменты не нарушали измеряемое поле.

Сравнения между предсказаниями и измерениями показывают, что результаты измерений хорошо согласуются с результатами, полученными путем теоретических выкладок.

## **2.2 Проблема обеспечения радиочастотным ресурсом новых радиотехнологий**

Логика данной проблемы схематично показана на рисунке 2.1 рост потребительского трафика ведет к появлению новых технологий. Те свою очередь форсируют рост потребностей в радиочастотном спектре и требования к его эффективному использованию.

Приведенные выше факторы увеличивают спектр задач по электромагнитной совместимости, новые радиоинтерфейсы со своей спецификой и особенностями требуют поиска решений ЭМС.

«Регулярной» спектральной маской в блоке спектра в зарубежной практике используется краевая маска блока ВЕМ в качестве критерия в проекте WARECS, при выделении спектра оператору [10].

Один из путей решения проблемы разработка условий совместного функционирования сетей нескольких стандартов в смежных полосах частот в пределах одного диапазона, называемый рефарминг, а также учет и вариантов комбинированного использования несущих частот DC/DB (Dual Carrier/Dual Band) при агрегировании в UMTS.

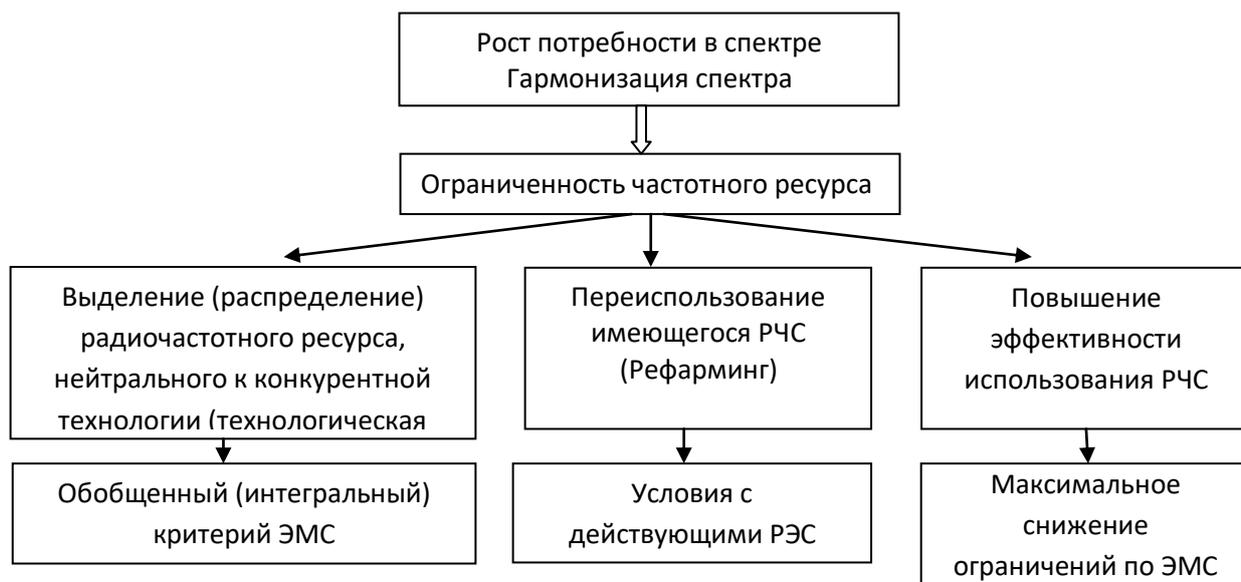


Рисунок 2.2- Пути радиочастотного обеспечения новых радиотехнологий

Увеличение эффективного использования радиочастотного диапазона в обозначенной логической цепочке – самое явное и основное условие, которое открывает возможность для внедрения новых радиотехнологий при ограниченном радиочастотном ресурсе. Эффективные методики оценки значений вводимых ограничений по ЭМС – реальный путь к нерасточительному использованию ограниченного национального ресурса.

Три основных фактора новых радиотехнологий влияющих на оценку ЭМС, которые можно выделить как характерные особенности в сравнении технологиями предыдущих поколений.

Новые радио-интерфейсы:

- Методы радиодоступа (Tx/Rx, MIMO, Diversity, Deamforming);
- Гетерогенный характер сети (Micro-, Macro, Pico-, Femto, доменные локальные сети);
- Способы передачи данных.

Динамическое изменение параметров радиолинии:

- Адаптация режимов передачи (Tx/Rx, MIMO, Diversity, Deamforming);
- Адаптация уровня модуляции (QPSK, 16QAM, 64QAM);
- Динамическая регулировка мощности;
- Динамическое планирование радиоресурса (изменение ширины канала в процессе работы);
- Самоконфигурация и оптимизация сети (SON).

Особенности использования радиочастот

- Агрегированный (объединенный) спектр;
- Адаптивное использование нескольких несущих (полос) частот под управлением общего канального протокола MAC (балансировка трафика в соте);

– Масштабируемая ширина канала (разные маски при разной ширине канала);

– Многоплановость (количество полос, разные условия ЭМС).

Принципиально новые радиointерфейсы системы ИМТ с новейшими методами радиодоступа, новыми способами пространственной передачи данных и сложной гетерогенной структурой радиосети.

Эти радиointерфы имеют возможность динамического изменения параметров, например, адаптивный выбор режима передачи, порядок модуляции и канального кодирования, динамическая регулировка мощности, динамического планирования ресурсов, самоконфигурации и оптимизации радиосети. Также в радиосетях использование радиочастотного спектра имеет важные особенности: объединение спектра за счет агрегации его фрагментов из разных полос и диапазонов, многоплановость частотного ресурса, каждой из идентифицированных полос радиочастот присущи свои особые условия ЭМС. Базовые особенности радиointерфейсов UMTS и LTE описаны подробно в [11]. Основные из них приведены на рисунке 2.3 для UMTS.

Свойства UMTS	Количественные параметры	Влияние на ЭМС
UMTS – система с расширенным спектром сигнала (широкополосная система): • имеет запас в отношении сигнал/шум, равный коэффициенту расширения спектра сигнала (SF)	• для линии AT > BC - SF = 4...256 – запас помехоустойчивости равен 6–24 дБ; • для линии BC > AT - SF = 4–512 – запас помехоустойчивости равен 6–27 дБ	Снижается уровень помех за счет меньшей требуемой мощности излучения передатчика БС в пользовательском канале
UMTS – система с кодовым разделением каналов: • обеспечивает эффективную регулировку мощности излучения в канале; • требуемая мощность излучения передатчика на канал и размер зоны обслуживания соты (сектора) зависят от степени их загрузки	• мощность излучения БС на один канал составляет (15–30) дБм; • возможные размеры зоны покрытия (радиус) соты составляют: 0,4–1,6 км	Уровень помех различен при разной загрузке сети. Снизить уровень помех можно за счет ограничения загрузки соты (сектора)
UMTS – переспективная, быстро развивающаяся технология: • позволяет использовать адаптивные методы пространственной селекции за счет применения адаптивных антенн в передатчике и приемнике	-	Снижается уровень помех за счет применения эффективной пространственной селекции при передаче и приеме (Beamforming)

Рисунок 2.3- Особенности радиointерфейса UMTS

С точки зрения ЭМС главная особенность новой технологии LTE/LTE-A состоит в использовании каналов с различной масштабируемой шириной и широком применении способов пространственной передачи данных посредством многоантенных систем MIMO. К другим особенностям этой технологии, которые могут существенно влиять на ЭМС, можно отнести следующее:

– маска спектра сигнала LTE в отличие от традиционного понимания есть функция как от отстройки по частоте, так и от масштабированной ширины канала и количества задействованного частотного ресурса в нем в текущий момент времени. В зависимости от ширины канала

уровень однотипных внеполосных излучений может отличаться на несколько дБ.

– При постоянной мощности передатчика и разной ширине канала LTE спектральная плотность мощности в радиоканале различна. Это означает, что уровень (мощность) помех в приемнике потенциально несовместимого РЭС будет зависеть от его полосы пропускания, а это позволяет считать, что для каждой ширины канала в сети LTE будут существовать группы таких РЭС.

– Существуют различные варианты планирования и назначения частотного ресурса в сети LTE, в том числе и с повторным их использованием, которые имеют целью снижение помех от соседних сот на границах зоны покрытия (механизмы ICIC, eICIC).

Отдельно следует выделить характерные особенности применения технологии ММО в сетях LTE.

Учитывая описанные особенности новых технологий, можно заключить, что сегодня необходим поиск новых, более эффективных подходов к оценке ЭМС.

Традиционные подходы детерминированы, трудоемки и сосредоточены в основном на расчете норм частотно-территориального разделения (СТР). Из-за своего детерминизма они обычно исходят из „двойственных“ сценариев и не могут максимально учитывать быстро меняющиеся условия взаимного влияния электронных устройств. Это приводит к оценке условий ЭМС с определенным пространством для маневра. Как показывает практика, этот запас имеет большое значение. Кроме того, такие процедуры не подходят некоторым функциональным режимам перспективных беспроводных интерфейсов (например, для режима Beam-forming, скоординированная Многоточечная передача в то время как ММО (CoMP), а также для познавательных беспроводной режимы).

Альтернативой таким подходам являются статистические методы, основанные на статистическом моделировании.

Их главные преимущества:

– простой, заранее настроенный и легко адаптируемый автоматизированный процесс;

– более полный учет реальных условий за счет моделирования ситуации при динамично изменяемых параметрах сети;

– возможность документировать сценарии расчета, исходные данные и результаты моделирования, т.е. формировать детальные документальные отчеты, что является важной и значимой особенностью для практики.

Общая задача ЭМС для технологий ИМТ. Классическое уравнение ЭМС устанавливает взаимосвязь энергетических, частотных и пространственных параметров РЭС-рецептора и РЭС-источника радиопомех, при которых

обеспечивается требуемое качество функционирования радиоэлектронного средства.

Уравнения ЭМС представляются в виде применительно к решаемой задаче:

$$P_{c,k} \geq P_{\Sigma,k} \cdot q_k, \quad (2.8)$$

где  $P_{c,k}$ ,  $P_{\Sigma,k}$  – мощности полезного и суммарного помехового сигналов на входе приемника  $k$ -го РЭС-рецептора помех соответственно,  $q_k$  – его защитное отношение.

Внутренние шумы приемника не учитываются, чтобы упростить рассуждения.

$$P_{\Sigma,k} = \sum_{i=1}^K \frac{P_i \cdot a_i(\Delta f) \cdot G_{TXi}(\theta) \cdot G_{RXk}(\theta)}{L(d_i)} \quad (2.9)$$

где  $P_i$  – мощность излучения  $i$ -го передатчика помех;  
 $a_i(\Delta f)$  – частотные характеристики (спектральная маска)  $i$ -го передатчика помех;

$\Delta f$  – разнос по частоте (разность между рабочими частотами передатчика помех и приемника-рецептора помех);

$G_{TX,i}(\theta)$  и  $G_{RX,k}(\theta)$  – коэффициенты усиления антенн  $i$ -го передатчика и приемника  $k$ -го РЭС (зависят от углов  $\theta$ , определяющих взаимное направление на рассматриваемые РЭС);

$L(d_i)$  – потери на трассе распространения сигнала  $i$ -го передатчика помех, удаленного от  $k$ -го РЭС на расстояние  $d_i$ .

С учетом (2) приведенное выше уравнение ЭМС (1) примет вид:

$$P_{c,k} \geq \sum_{i=1}^K \frac{P_i \cdot A_i(\Delta F) \cdot G_{TX,i}(\Theta) \cdot G_{RX,k}(\Theta)}{L(D_i)} \cdot Q_k, \quad (3.0)$$

Для выполнения данного условия при расчете норм ЧТР определяются требуемые значения параметра  $\Delta f$  (частотный разнос) и параметра  $d$  (территориальный разнос).

В рамках обсуждаемого вопроса особенность имеет такой параметр, Мощность излучения  $P_i$   $i$ -го источника помех, в качестве которого рассматривается передатчик базовых станций (BS) систем UMTS и LTE (далее  $P_i = P_{BS,i}$ ) имеет особенности в рассматриваемом случае.

Согласно [5], на мощность базовой станции UMTS имеющей динамический характер влияет ряд параметров. Суммарная мощность

излучения BS UMTS, требуемая для поддержания  $N$  пользовательских каналов, должна удовлетворять следующему требованию

$$P_{BSi} \geq \frac{P_N}{1-H_{DL}} \sum_{j=1}^N \frac{L(D_j)}{G_{BSj} \cdot g_{PC}} \cdot \frac{1}{\frac{G_{PJ}}{q_j \cdot N_j} + (1-A_j)} \quad (3.1)$$

Данное неравенство (4) определяет минимальную необходимую мощность базовой станции UMTS с учетом энергетического запаса, который необходим для компенсации помех от соседних ячеек и компенсации потерь, возникающих из-за нарушения ортогональности кодов в реальных условиях нисходящих пользовательских каналов (параметр  $a$ ).

Кроме того требуемая мощность зависит от задаваемого отношения сигнал/шум на входе приемника абонентского терминала ( $q$ ) каждого пользователя, выигрыша по энергетике ( $G_p$ ) за счет расширения спектра сигнала и от потерь  $L(d)$  на трассе между передатчиком BS и пользовательским приемником, т.е. от расстояния пользователей от этой базовой станции. В выражении (3.1) применяются и другие параметры:

$P_N$  – мощность шума в приемнике АТ;

$G_{BS}$  – коэффициент усиления антенны BS в направлении абонентского терминала;

$g_{PC}$  – коэффициент динамической регулировки мощности;

$v_j$  – коэффициент активности  $j$ -го абонента.

Особо следует подчеркнуть, что в UMTS, как в системе с кодовым разделением каналов, требуемые уровни сигнала для пользовательских каналов, создаваемые суммарной мощностью базовой станции  $P_{BSi}$ , одновременно являются и внутрисистемными помехами на входе приемника каждого пользователя. Это, в свою очередь, вынуждает иметь в ресурсе радиоканала запас по энергетике, равный росту уровня внутрисистемных помех. С учетом описанных выше особенностей запишем уравнение ЭМС в окончательной форме:

$$\frac{P_{c,k}}{\sum_{i=1}^K \frac{\alpha_i(\Delta f) \cdot G_{TX,i}(\theta) \cdot G_{RX,k}(\theta)}{L(d_i)} \cdot \frac{P_N}{1-\eta_{DL}} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{L(d_j)}{G_{BSj} \cdot g_{PC}} \cdot \frac{1}{\frac{G_{PJ}}{q_j \cdot v_j} + (1-\alpha_j)}} \geq q_k \quad (3.2)$$

Сложный характер уравнения ЭМС для системы UMTS имеет ярко выраженную взаимной зависимостью параметров радиointерфейса. Так, на приемник  $k$ -го РЭС влияет базовая станция UMTS, вызывающая помеху и еще влияет целый ряд параметров сети UMTS. В реальных условиях большая часть этих параметров носят случайный характер или являются просто переменными. К таким параметрам относят:

- количество активных пользователей (N);
- взаимное расстояние между РЭС в сети UMTS (L(dj));
- взаимное относительное направление на РЭС ( $G_{TX,i}(\theta)$ ,  $G_{RX,k}(\theta)$ );
- динамическая регулировка мощности ( $g_{PC}$ ).

Учитывая случайный характер перечисленных параметров, уравнение (5) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\overline{P}_{c,k}}{\sum_{i=1}^K \frac{\alpha_i(\Delta f) \cdot G_{TX,i}(\overline{\theta}) \cdot G_{RX,k}(\overline{\theta})}{L(\overline{d}_i)} \cdot \frac{P_N}{1-\eta_{DL}} \cdot \sum_{j=1}^{\overline{N}} \frac{L(\overline{d}_j)}{G_{BSj} \cdot \overline{g}_{PC}} \cdot \frac{1}{q_j \cdot \nu_j} + (1-\alpha_j)} \geq q_k \quad (3.3)$$

где все параметры с чертой сверху есть случайные величины с соответствующим распределением T [X(a)], а – некоторый параметр распределения. Например:

$$G_{TX,i}(\overline{\theta}) = G_{TX,i} \cdot T_\theta[X(a)] \quad (3.4)$$

Здесь уместно сделать акцент на двух важных обстоятельствах. Первое, в силу случайного характера параметров помехи, создаваемой базовыми станциями сети UMTS, достоверная оценка ее воздействия на РЭС будет статистической. Второе, в ряде рекомендаций ITU-R степень воздействия радиопомех определяется вероятностным критерием. В качестве такого критерия чаще выступает вероятность их недопустимого воздействия на РЭС мощность помех в заданном интервале времени (% времени, когда отношение сигнал/помеха  $q_k$  на входе приемника РЭС ниже допустимого). Данный критерий для типичных условий в сетях связи определяется интегралом вероятностей:

$$P_{\text{помех}} = 100 \cdot F\left\{ \frac{\overline{P}_{c,k}}{P_{\Sigma,k}} < q_k \right\} = 100 \int_{q_{0k}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \frac{dt}{\sqrt{2\pi}} \quad (3.5)$$

где  $q_{0k}$  – значение защитного отношения в приемнике РЭС-рецептора помех, заданное по условиям оценки ЭМС, а аргументом интеграла вероятностей F { } является выражение (3.5).

Для получения точных оценок в ходе определения условий ЭМС для сетей UMTS наиболее приемлемым становится метод статистического моделирования, получивший название метода Монте-Карло. Метод Монте-

Карло – это численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных чисел. Он позволяет моделировать любой процесс, на протекание которого влияют случайные факторы. Особенностью данного метода является простота структуры вычислительного алгоритма [12]. Удобной на сегодняшний день инструментальной реализацией данного метода является программный продукт SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool), который был разработан и принят в рамках CEPT (European Conference of Postal and Telecommunication) [13].

Практическая реализация алгоритмов статистической оценки ЭМС сотовых систем связи, методом Монте-Карло представлена в рекомендованных МСЭ пакетах программ SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte-Carlo Analysis Tool) разработанным ЕСО (European Communications Office).

Данный программный продукт является многофункциональным средством статистического моделирования и может применяться для решения целого ряда задач по ЭМС. Для описания случайных (изменяемых) параметров сетей в SEAMCAT используется несколько видов распределения случайных величин: равномерное, дискретное равномерное, дискретное неравномерное, нормальное (гауссовское), релеевское распределение и распределение, задаваемое пользователем. Имеется возможность использовать для описания потерь на трассе распространения сигнала следующие общепринятые модели: усовершенствованная модель Хата (Extended Hata) при учете дифракций и переходных сред (внутренняя-внешняя), модель для свободного пространства (Freespace), модель МСЭ-R P.1546 и произвольные модели, задаваемые пользователем. SEAMCAT имеет удобный пользовательский интерфейс, позволяющий вводить маску спектра сигнала и диаграммы направленности антенн с визуальным их отображением на экране, графически отображать векторы сигналов (полезного и помехового), функции их распределения и плотность вероятностей.

SEAMCAT (Spectrum Engineering Advanced Monte-Карло Аналитический инструмент) представляет собой статистическую имитационную модель, которая использует метод анализа под названием Монте-Карло, чтобы оценить потенциальные помехи между различными системы радиосвязи, такие как радиовещание, точка-точка, точка-точка, радиолокационная станция, мобильная сеть связи, авиационные и спутниковые.

SEAMCAT - это программный инструмент, ориентированный на систему радиочастотного спектра, который позволяет создавать собственные библиотеки (такие как антенны, спектральные маски, модели распространения, системы радиосвязи) или использовать те, которые предоставляются другими пользователями, чтобы облегчить усилия по созданию полных сценариев для исследования. SEAMCAT распространяется с набором библиотек.

SEAMCAT разработан так, что функция воспроизведения и плагины могут помочь радиоинженерам понять, как выполняются симуляции или расширить алгоритмы. Фундаментальная концепция SEAMCAT состоит в том, чтобы обеспечить легкий обмен исследованиями совместимости радиочастотного спектра. (параметры, методы и результаты) в рамках СЕРТ с использованием общего интерфейса. SEAMCAT является открытым исходным инструментом и, следовательно, в свободном доступе. SEAMCAT широко используется в командах проекта СЕРТ, а также за пределами СЕРТ по всему миру со стороны регулирующих органов, промышленности и научных кругов. Сценарии могут быть изучены, воссозданы и пересмотрены любой из заинтересованных сторон, использующих SEAMCAT. Единственная область для обсуждения – ввод параметры и сценарии исследования. Исследования могут охватывать и не ограничиваться:

- исследования совместного использования и совместимости на другом оборудовании, работающем на одной или соседней частоте группы;

- оценка воздействия использования разных систем передачи и приема масок.

На рисунке 2.4 окно программы SEAMCAT в режиме расчета радиобюджета.

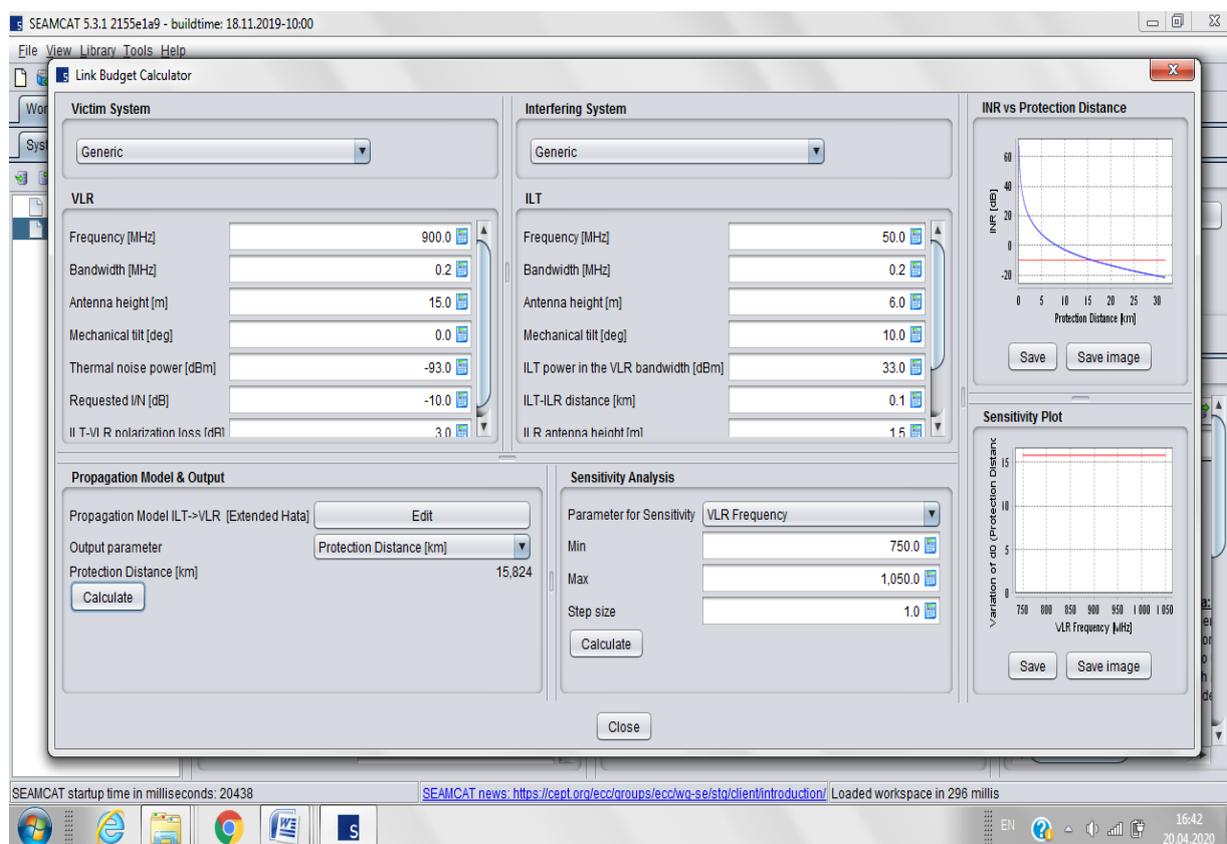


Рисунок 2.4 - Окно программы SEAMCAT в режиме расчета радиобюджета

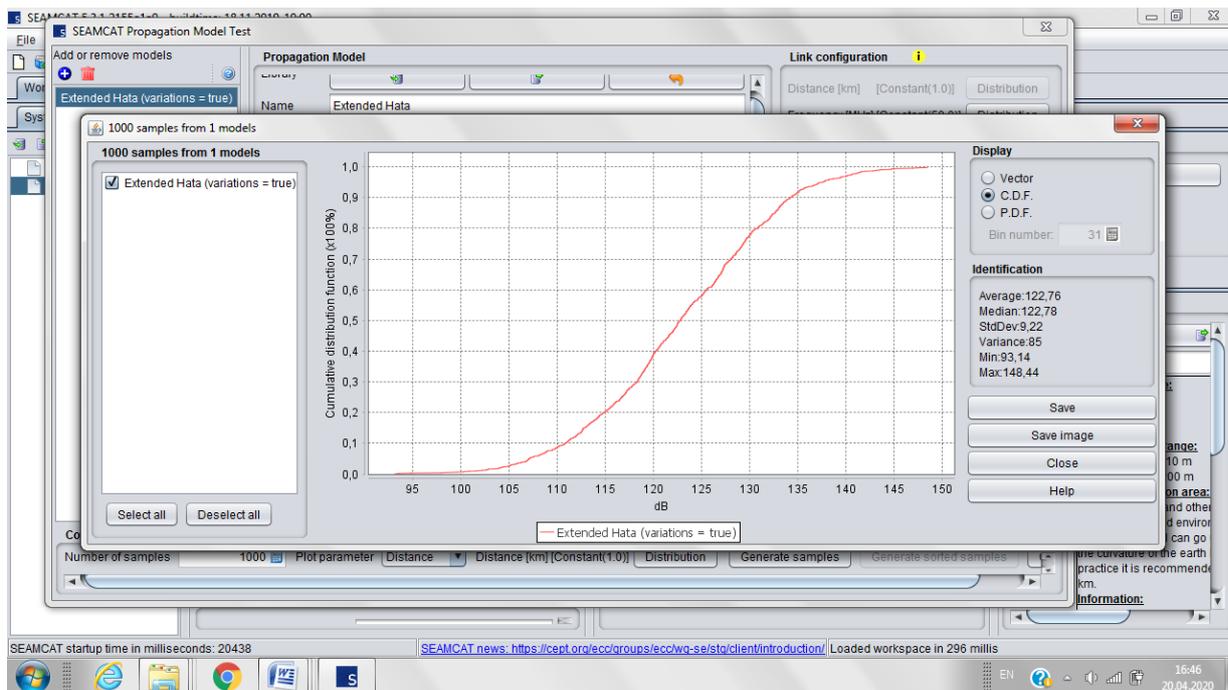


Рисунок 2.5- Окно программы SEAMCAT в режиме проверки модели распространения радиосигнала

В результате моделирования в программе SEAMCAT, получены графики, изображенные на рисунке 2.6.

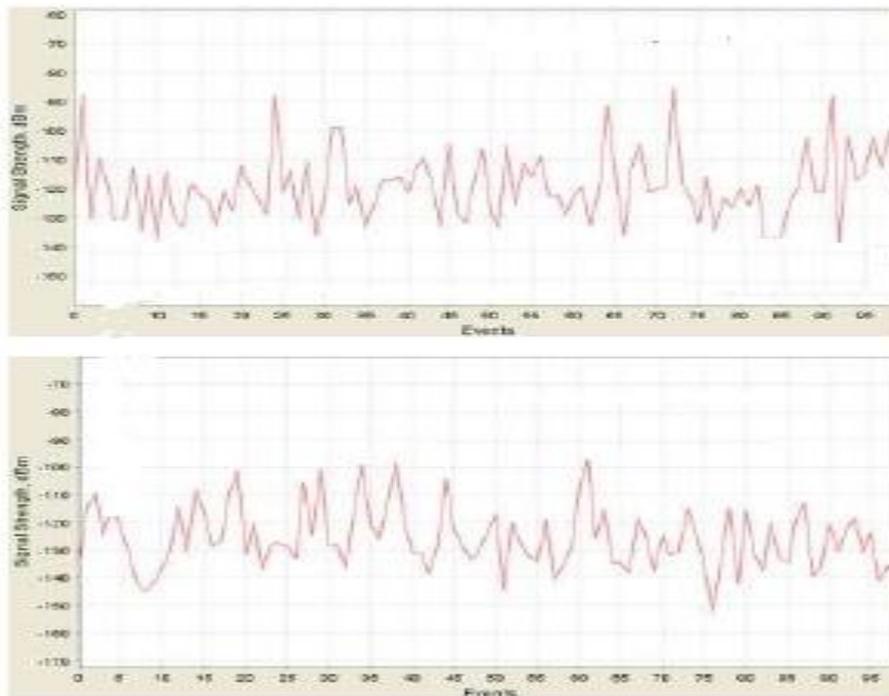


Рисунок 2.6 – Значения уровня сигнала, рассчитанные с помощью программы SEAMCAT

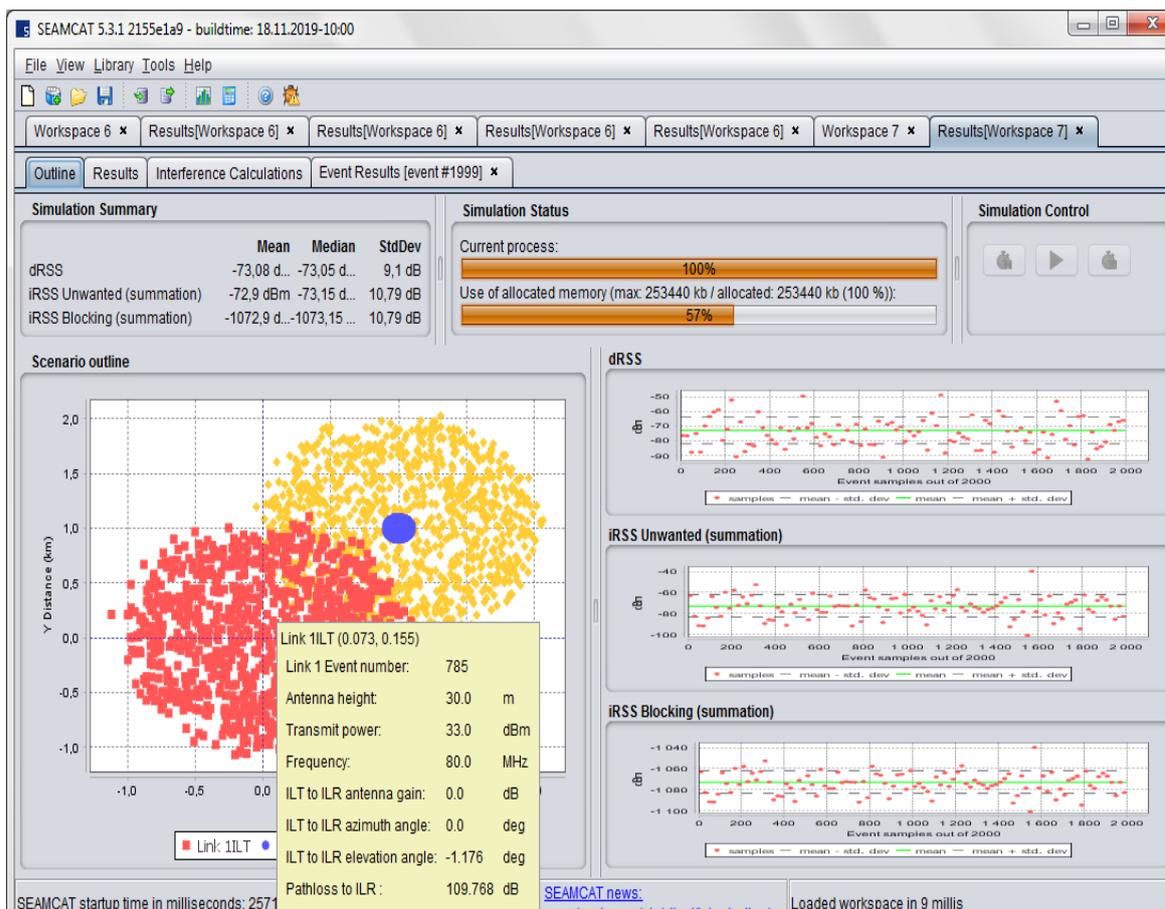


Рисунок 2.7 – Значения уровня сигнала, рассчитанные с помощью программы SEAMCAT

Среднее значение  $P = -73,08$  дБм (рисунок 2.7).

### 3 Методика проведения эксперимента

Технические характеристики изделия во многом зависят от его конфигурации и версии программного обеспечения. В таблице приведены минимальные и максимальные (в скобках) значения.

- диапазон частот 1 Гц – 4.4 (12.4) ГГц;
- динамический диапазон -151 - +10 дБм;
- разрешение по частоте (RBW) 0.1 Гц - 250 кГц;
- точность измерения уровней 0.25 дБ;
- полоса частот I/Q демодулятора 240 кГц;
- скорость сканирования 140 МГц/с;
- количество каналов 2 (5);
- наличие GPS нет (есть);
- диапазон рабочих температур, градусов Цельсия +5...+40;

- электропитание: от сети 200...240 В/ 50 Гц;
- время непрерывной работы изделия от сети 220 В не ограничено;
- размеры корпуса изделия, мм 455×345×150;
- вес изделия, кг, не более

Состав изделия:

- многоканальный анализатор спектра «БАРС»;
- адаптер питания (далее - адаптер) - 2 шт;
- приёмник GPS (опционально).

Устройство и работа

Конструктивно многоканальный анализатор спектра «БАРС» выполнен в виде переносного моноблока, объединяющего в одном корпусе модули анализаторов спектра, а также ноутбук. Внешний вид показан на рисунке 1.



Рисунок 2.8 - Внешний вид многоканальный анализатор спектра «БАРС»

Электропитание многоканального анализатора спектра осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц через блоки питания (адаптеры). Адаптеры питания предназначены для преобразования напряжения 220 В/50 Гц в постоянное напряжение +5 В (для работы модулей анализаторов спектра) и +18 В (для работы ноутбука).

В качестве модулей измерителей спектра в анализаторе используются изделия SA44B (1Гц-4,4 ГГц) и SA124B (100 кГц-12,4 ГГц). На первом канале всегда устанавливается модуль SA44B.

Многоканальный анализатор спектра «БАРС» работает в следующих режимах:

- одноканальном;
- многоканальном.

В одноканальном режиме используется только первый канал и программное обеспечение, поставляемое изготовителем изделия SA44B. Оно позволяет производить измерение спектров и демодуляцию радиосигналов. Одноканальный режим предназначен для поиска радиосигналов и оценки их характеристик.

В многоканальном режиме БАРС может снимать спектрограммы заданных оператором участков спектра периодически, через интервалы времени, которые можно задавать с точностью до 1 секунды с записью результатов в базу данных на всех имеющихся каналах независимо друг от друга.

Блок измерителей спектра представляет собой набор измерительных модулей типа SA44B и SA124B, подключаемых к компьютеру через USB интерфейс. Каждый модуль имеет свой уникальный идентификационный номер, по которому компьютер идентифицирует входные каналы.

Измерительные модули могут работать в двух режимах – измерения спектра и демодуляции радиосигнала. Управление режимами работы осуществляет компьютер с помощью программного обеспечения через USB интерфейс, по которому он получает и результаты измерений. Полученные замеры заносятся в базу данных.

В базовой поставке в качестве опорных генераторов используются встроенные в модули кварцевые генераторы, что обеспечивает точность измерения частотных составляющих не хуже чем  $5 \cdot 10^{-6}$  от значения частоты. В расширенных вариантах поставки анализатор может комплектоваться специальным высокостабильным опорным генератором с точностью не хуже  $10^{-8}$  и выше.

Изделие может работать в двух режимах: в одноканальном и многоканальном, выбор которых осуществляется с помощью меню на вкладке «режим», рисунок 2.9.

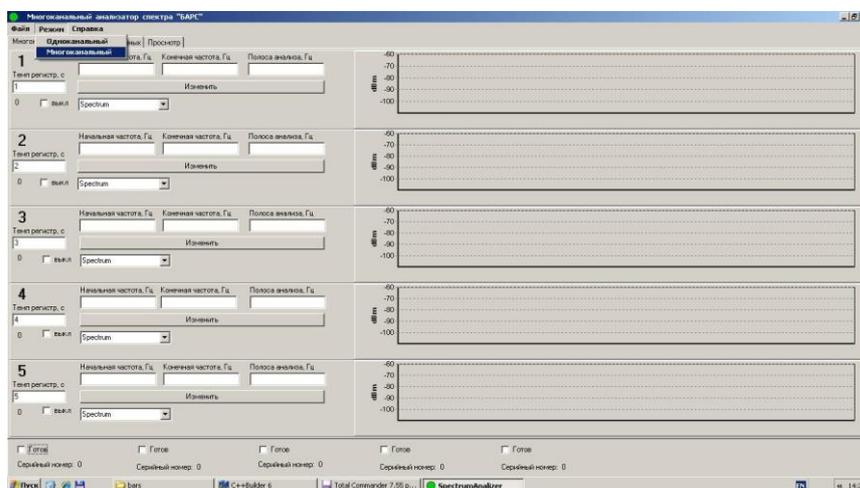


Рисунок 2.9– Выбор режима измерений

При выборе одноканального режима появится окно программы.

Пользователь может давать команды, используя панель управления (Control Panel) и меню (Menu). Результаты измерений отображаются на фоне координатной сетки (Graticule) в виде графика (Trace). Для облегчения измерений можно использовать маркер (Marker) и строку состояний (Status Bar).

Подключить антенны к тем каналам, которые готовы для работы, и в полях «Начальная частота», «Конечная частота» и «Полоса анализа» рабочих каналов установить требуемые значения в герцах. В поле «Темп регистрации» задаётся период (в секундах), с которым необходимо проводить измерение. Данная величина определяется программно при калибровке системы и не может изменяться пользователем.

После подготовки задания на измерение в окне «Выкл» под полем «Темп регистрации» необходимо поставить галочку, при этом надпись заменится на «Вкл» и начнутся измерения. Результаты измерений записываются в текстовые файлы директорий соответствующих серийных номеров анализаторов и текущих дат и отображаются на графиках в правой части экрана рисунок 2.10.

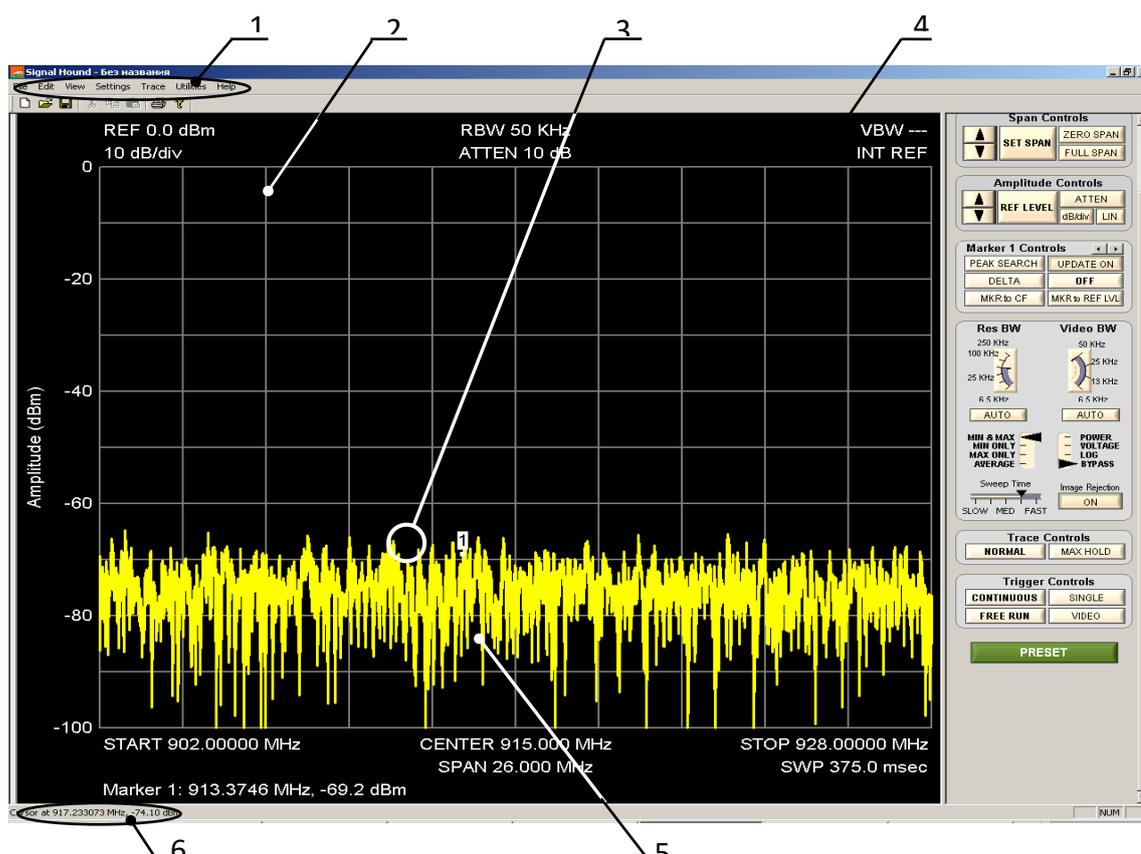


Рисунок 2.10 - Основное окно программы

1 - меню (Menu); 2 - координатная сетка (Graticule); 3 - маркер (Marker); 4 - панель управления (Control Panel); 5 - график (Trace); 6 – строка Star

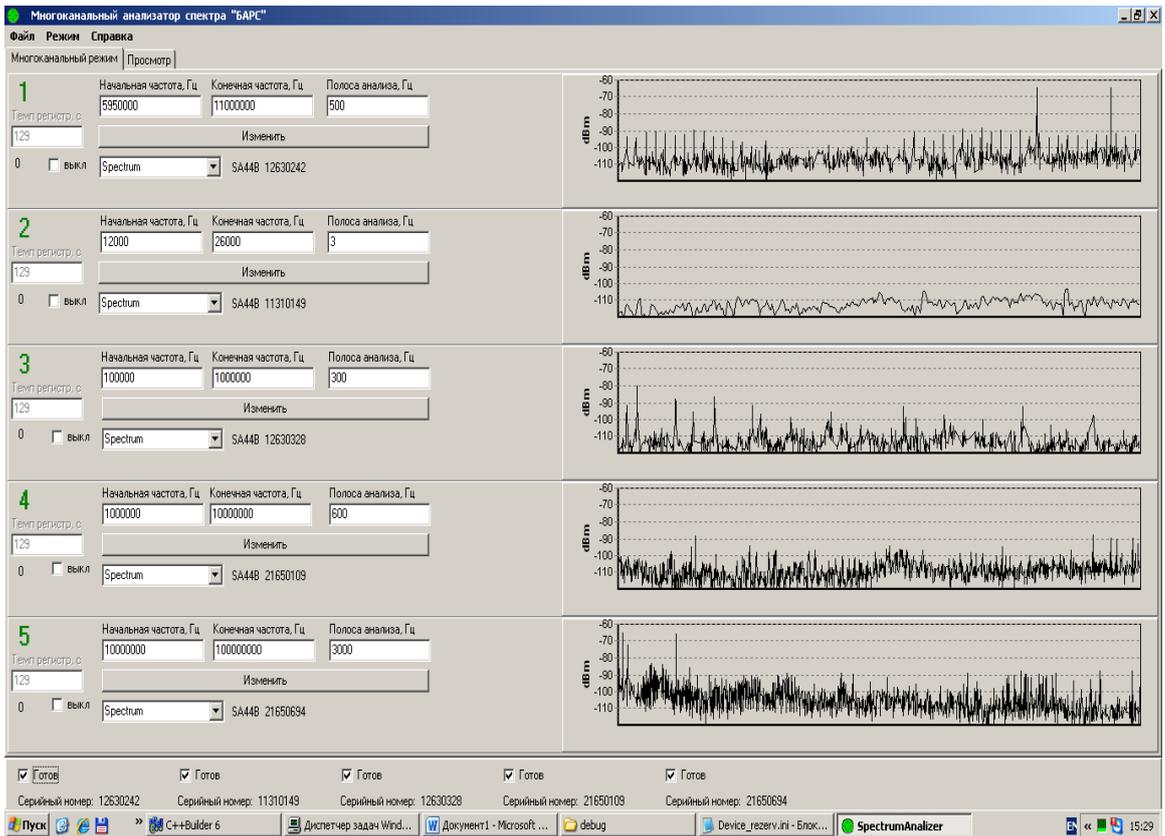


Рисунок 2.11 – Снятие спектрограмм в многоканальном режиме

На рисунке 2.11 показано снятие спектрограмм в многоканальном режиме работы анализатора. Для детального просмотра достаточно дважды щёлкнуть мышью по нужной спектрограмме, расположенной в правой части экрана. Откроется окно «Просмотр», показанное на рисунке 2.12. Стрелками, расположенными слева от графика, можно регулировать (растянуть или сузить) ширину спектрограммы.

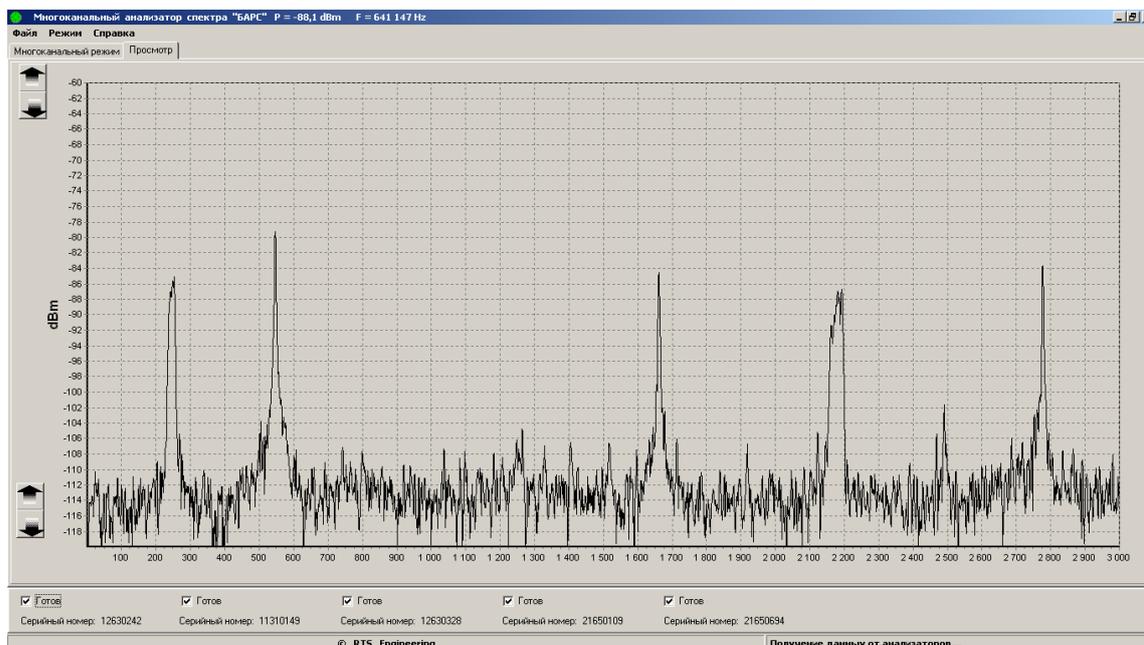


Рисунок 2.12 –Спектрограмма

## 4 Результаты эксперимента

### 4.1 Измерения на частотах от 50 до 90 МГц

Результаты измерений многоканального анализатора спектра «Барс» представлены на рисунке 4.1.

Измеренные значения мощности сигнала автоматически записываются в редактор Блокнот в виде таблицы. Затем при необходимости их можно экспортировать в любую базу данных. Данные были экспортированы в Microsoft Excel, так как с таблицами удобно работать. В таблицах 4.1 и 4.2 представлены результаты экспортированные Microsoft Excel.

50-50,01 МГц results\_avg — Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

12.09.2018 20:02:24 Результаты усреднения  
 Диапазон частот: 50002778,125 - 50102785,07 Гц  
 Начальная дата: 21.12.2018. Конечная дата: 16.02.2019  
 Шаг усреднения: 1 ч. 0 мин.

День	года	Дата	время	Мощность в дБ	Мощность в мВт
355	21.12.2018	0:00:00	-71.110943689729	7.74293531274629E-8	
355	21.12.2018	1:00:00	-71.524121003813	7.04024705549402E-8	
355	21.12.2018	2:00:00	-71.4521428531907	7.15790144922524E-8	
355	21.12.2018	3:00:00	-72.3943477891683	5.76189342503702E-8	
355	21.12.2018	4:00:00	-72.2400659998316	5.97026213493892E-8	
355	21.12.2018	5:00:00	-72.184802437732	6.04671857479745E-8	
355	21.12.2018	6:00:00	-74.4071867803214	3.62477723771364E-8	
355	21.12.2018	7:00:00	-77.2975798320001	1.86312510048597E-8	
355	21.12.2018	8:00:00	-74.6624726727048	3.41784790591971E-8	
355	21.12.2018	9:00:00	-72.4029666986204	5.75046984171462E-8	
355	21.12.2018	10:00:00	-71.9582697643428	6.37049271731912E-8	
355	21.12.2018	11:00:00	-72.5273452692191	5.58811677602566E-8	
355	21.12.2018	12:00:00	-72.0687538930437	6.210472037115E-8	
355	21.12.2018	13:00:00	-75.5469091364726	2.788104750229E-8	
355	21.12.2018	14:00:00	-73.8959870790566	4.07756874889198E-8	
355	21.12.2018	15:00:00	-71.6218999684856	6.88351087935933E-8	
355	21.12.2018	16:00:00	-74.218164793659	3.78602537703642E-8	
355	21.12.2018	17:00:00	-74.0885142083191	3.90075414961189E-8	
355	21.12.2018	18:00:00	-75.5632240737652	2.77765045663558E-8	
355	21.12.2018	19:00:00	-75.6336264804402	2.73298565373436E-8	
355	21.12.2018	20:00:00	-74.1740700537992	3.82466141610435E-8	
355	21.12.2018	21:00:00	-74.0674459140571	3.91972328271788E-8	
355	21.12.2018	22:00:00	-75.0562561800314	3.1215793708416E-8	
355	21.12.2018	23:00:00	-75.6336324457925	2.73298189978133E-8	
356	22.12.2018	0:00:00	-74.8987488098333	3.23686896780936E-8	
356	22.12.2018	1:00:00	-73.5217677799261	4.44450318755212E-8	
356	22.12.2018	2:00:00	-73.0904921719895	4.90852246291732E-8	
356	22.12.2018	3:00:00	-74.7345732272692	3.36157400957262E-8	
356	22.12.2018	4:00:00	-76.833948455784	2.07302793486366E-8	

Рисунок 4.1- Результаты измерений на частоте 50МГц

Анализ результатов измерений проведен с помощью пакета статистика. STATISTICA - это универсальная интегрированная система, предназначенная для статистического анализа и визуализации данных, управления базами данных и разработки пользовательских приложений, содержащая широкий набор процедур анализа для применения в научных исследованиях, технике, бизнесе, а также специальные методы добычи данных.

Помимо общих статистических и графических средств в системе имеются специализированные модули, например, для проведения социологических или биомедицинских исследований, решения технических и, что очень важно, промышленных задач: карты контроля качества, анализ процессов и планирование эксперимента.

Работа со всеми модулями происходит в рамках единого программного пакета, для которого можно выбирать один из нескольких предложенных интерфейсов пользователя.

С помощью реализованных в системе STATISTICA мощных языков программирования, снабженных специальными средствами поддержки, легко создаются законченные пользовательские решения и встраиваются в различные другие приложения или вычислительные среды.

Таблица 4.1- Результаты измерений за 10 дней на частоте 80МГц

Диапазон частот: 79998611,285 - 80098618,23 Гц										
Начальная дата: 21.12.2018. Конечная дата: 16.02.2019										
Шаг усреднения: 1 ч. 0 мин.										
Время	21 дек	22 дек	23 дек	24 дек	25 дек	26 дек	27 дек	28 дек	29 дек	30 дек
	P1, дБ	P2, дБ	P3, дБ	P4, дБ	P5, дБ	P6, дБ	P7, дБ	P8, дБ	P9, дБ	P10, дБ
0	-76,297	-77,465	-76,573	-77,394	-78,106	-78,625	-76,660	-78,803	-78,719	-78,991
1	-76,083	-77,908	-76,904	-77,046	-78,092	-78,561	-77,351	-78,725	-78,587	-78,980
2	-75,952	-78,199	-77,125	-77,007	-78,132	-78,232	-76,994	-78,873	-78,552	-78,627
3	-76,997	-77,311	-76,834	-77,011	-78,028	-78,251	-77,779	-78,751	-78,128	-78,541
4	-77,632	-76,999	-76,828	-77,431	-78,329	-77,941	-77,259	-78,880	-78,206	-78,518
5	-77,138	-76,232	-76,530	-77,299	-78,793	-77,482	-76,969	-78,832	-77,503	-79,111
6	-77,555	-76,070	-76,631	-77,192	-78,713	-77,805	-77,384	-78,457	-77,761	-78,638
7	-77,206	-76,623	-76,504	-77,256	-78,294	-77,600	-76,505	-78,732	-78,108	-78,416
8	-77,510	-75,741	-76,313	-77,051	-78,138	-77,850	-76,880	-78,942	-78,242	-78,740
9	-77,742	-75,684	-76,933	-77,138	-77,981	-78,969	-77,434	-78,242	-77,972	-78,553
10	-77,253	-75,982	-76,508	-76,581	-77,744	-77,677	-77,209	-78,423	-77,592	-78,679
11	-77,079	-75,510	-76,203	-77,106	-78,209	-77,689	-77,891	-77,787	-77,281	-79,268
12	-76,342	-76,204	-76,445	-76,423	-78,125	-76,947	-78,229	-77,733	-77,842	-79,343
13	-76,485	-76,502	-76,188	-77,241	-78,147	-77,063	-77,629	-77,356	-78,244	-79,235
14	-77,662	-76,091	-77,171	-77,450	-77,764	-78,885	-77,489	-77,351	-78,181	-79,678
15	-76,356	-77,001	-77,119	-77,866	-77,326	-77,718	-78,025	-77,679	-78,689	-79,450
16	-77,298	-77,701	-76,541	-77,535	-77,517	-76,523	-78,070	-78,224	-78,539	-78,806
17	-76,862	-76,931	-77,229	-78,852	-77,724	-76,778	-78,522	-78,391	-78,219	-79,013
18	-77,982	-76,488	-77,471	-78,874	-77,550	-76,740	-78,553	-78,349	-78,056	-78,735
19	-78,396	-76,887	-77,533	-78,907	-78,310	-76,744	-78,817	-77,918	-77,677	-79,191
20	-78,459	-77,280	-77,431	-78,296	-77,712	-77,672	-78,586	-78,591	-78,308	-79,633
21	-78,323	-77,469	-77,217	-78,302	-77,498	-78,454	-78,407	-78,027	-78,250	-79,311
22	-77,618	-77,048	-77,044	-77,884	-78,148	-76,304	-78,712	-78,524	-78,476	-79,335
23	-77,596	-76,852	-77,000	-78,261	-78,739	-76,597	-78,706	-77,803	-78,747	-79,637

Таблица 4.2- Результаты измерений за 10 дней на частоте 90МГц

Диапазон частот: 89999305,816 - 90099312,761 Гц										
Начальная дата: 21.12.2018. Конечная дата: 16.02.2019										
Шаг усреднения: 1 ч. 0 мин.										
Время	21 дек	22 дек	23 дек	24 дек	25 дек	26 дек	27 дек	28 дек	29 дек	30 дек
	Р, дБ									
0	-95,474	-95,418	-95,659	-95,037	-96,485	-94,905	-95,623	-96,033	-96,360	-96,175
1	-95,677	-95,289	-95,747	-94,878	-96,019	-94,951	-95,092	-96,177	-96,625	-96,222
2	-95,480	-95,238	-96,043	-94,996	-95,711	-94,873	-95,093	-95,797	-96,524	-96,020
3	-95,659	-95,029	-96,057	-95,126	-95,667	-94,880	-95,349	-96,033	-95,930	-96,159
4	-95,785	-95,347	-96,636	-95,011	-96,128	-94,742	-95,080	-96,046	-96,401	-96,271
5	-95,593	-95,166	-96,158	-95,133	-95,846	-95,398	-95,532	-96,034	-96,129	-95,928
6	-95,321	-95,741	-96,512	-95,121	-95,561	-95,277	-95,344	-96,062	-96,023	-96,183
7	-95,712	-94,870	-96,521	-94,583	-95,245	-95,548	-95,162	-96,060	-96,431	-96,340
8	-95,501	-94,696	-95,920	-95,131	-95,489	-95,420	-95,313	-95,511	-96,547	-96,454
9	-95,779	-95,437	-96,460	-94,856	-95,534	-95,262	-95,280	-96,115	-96,287	-96,541
10	-95,349	-95,178	-96,414	-95,253	-95,307	-95,032	-95,662	-96,007	-95,961	-96,238
11	-95,399	-95,221	-96,081	-96,021	-95,192	-94,802	-95,359	-95,879	-96,104	-96,112
12	-95,760	-95,196	-95,939	-95,783	-95,339	-94,591	-95,834	-96,349	-95,640	-96,133
13	-95,583	-95,079	-96,078	-95,729	-95,641	-94,586	-95,692	-96,001	-95,327	-96,000
14	-95,493	-94,505	-95,910	-95,510	-95,173	-94,594	-95,918	-95,784	-95,994	-96,244
15	-95,748	-95,619	-95,438	-95,756	-94,843	-95,001	-96,033	-96,273	-95,803	-96,527
16	-95,707	-94,583	-95,580	-96,162	-95,051	-95,146	-95,702	-95,907	-96,197	-96,347
17	-95,605	-95,090	-95,346	-96,252	-94,596	-95,184	-95,583	-96,005	-96,143	-96,325
18	-95,580	-94,996	-95,480	-95,779	-95,418	-95,271	-95,999	-96,153	-96,436	-95,996
19	-95,302	-95,274	-95,336	-95,370	-95,242	-95,285	-96,013	-96,233	-96,060	-96,183
20	-95,452	-95,261	-95,093	-96,430	-95,262	-95,133	-95,910	-95,888	-96,381	-95,674
21	-95,943	-95,348	-95,082	-96,003	-95,478	-95,187	-96,011	-96,458	-96,133	-96,044
22	-96,167	-95,541	-95,130	-96,252	-95,336	-94,875	-95,806	-96,069	-95,661	-96,089
23	-95,792	-95,134	-94,763	-95,603	-94,767	-95,313	-96,407	-96,422	-95,952	-96,233

Очень трудно представить себе, что кому-то могут понадобиться абсолютно все статистические процедуры и методы визуализации, имеющиеся в системе STATISTICA, однако опыт многих людей, успешно работающих с пакетом, свидетельствует о том, что возможность доступа к новым, нетрадиционным методам анализа данных (а STATISTICA предоставляет такие возможности в полной мере) помогает находить новые способы проверки рабочих гипотез и исследования данных.

На рисунке 4.2 показана динамика колебаний уровня мощности сигнала в течение суток на частоте 50МГц

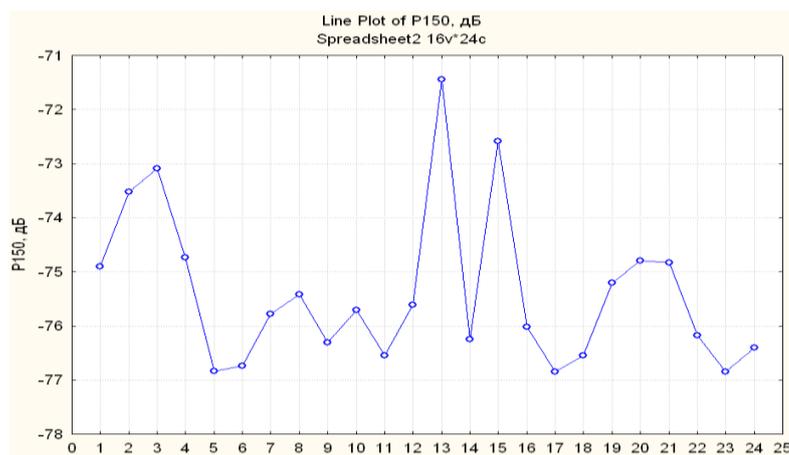


Рисунок 4.2 – Колебания уровня мощности сигнала в течении суток на частоте 50МГц

Математическое ожидание уровня мощности сигнала составило -75,38 дБ, его минимальное значение -76,85 дБ, максимальное -71,44 дБ. В половине их 24 измерений уровень сигнала не превышал -75,74 дБ, во второй половине был выше этого значения. Как показано на рисунке 3, наблюдается тенденция некоторого снижения уровня мощности сигнала в течении исследуемого периода. Выявлена линейная функция тренда, описываемая формулой:

$$Y = -74,767 - 0,049 * t,$$

где Y – уровень мощности сигнала;

t - момент времени час;

Таким образом, каждый час уровень сигнала снижается в среднем на 0,049 дБ.

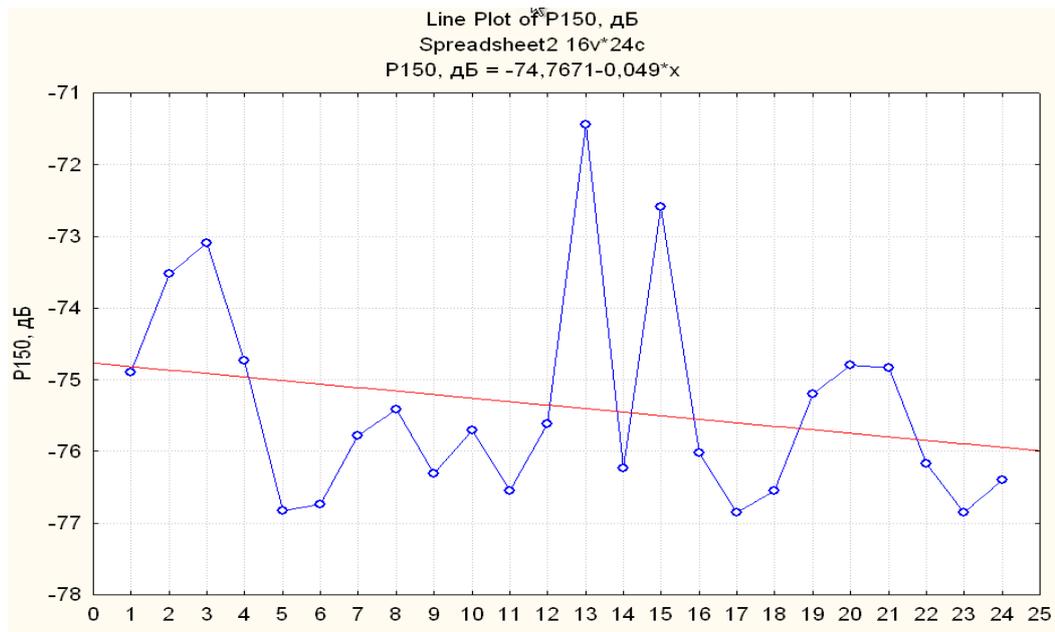


Рисунок 4.3 – Результаты измерений на частоте 50МГц за сутки с рассчитанной линией тренда

Descriptive Statistics (Spreadsheet2)								
Variable	Valid N	Mean	Median	Mode	Frequency of Mode	Minimum	Maximum	Std.Dev.
P150, дБ	24	-75,3796	-75,7400	Multiple	2	-76,8500	-71,4400	1,449955

Рисунок 4.4– Статистические данные по уровню мощности на частоте 50МГц за сутки

В течении суток наблюдается спад мощности сигнала, что хорошо прослеживается по линии тренда на рисунке 4.3, на рисунке 4.5 показаны статистические характеристики исследуемого показателя.

Анализ же данных за 16 суток (частота 50МГц) показал, что среднее за сутки значение уровня мощности сигнала практически не меняется (рисунок 4.5).

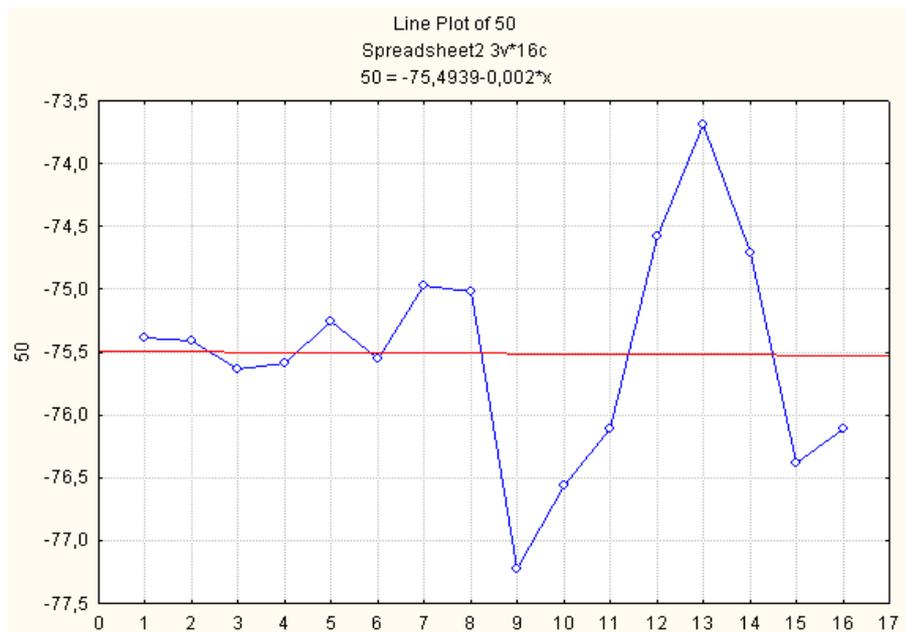


Рисунок 4.5– Колебания среднего за 16 суток измерений на частоте 50МГц и линия тренда

На рисунках 4.6 и 4.7 приведен анализ измерений за 16 суток на частотах 80МГц и 90 МГц соответственно. В обоих случаях наблюдается заметное снижение уровня мощности сигнала в среднем за сутки: для 80МГц на 0,0971 дБ и для 90МГц на 0,05 дБ.

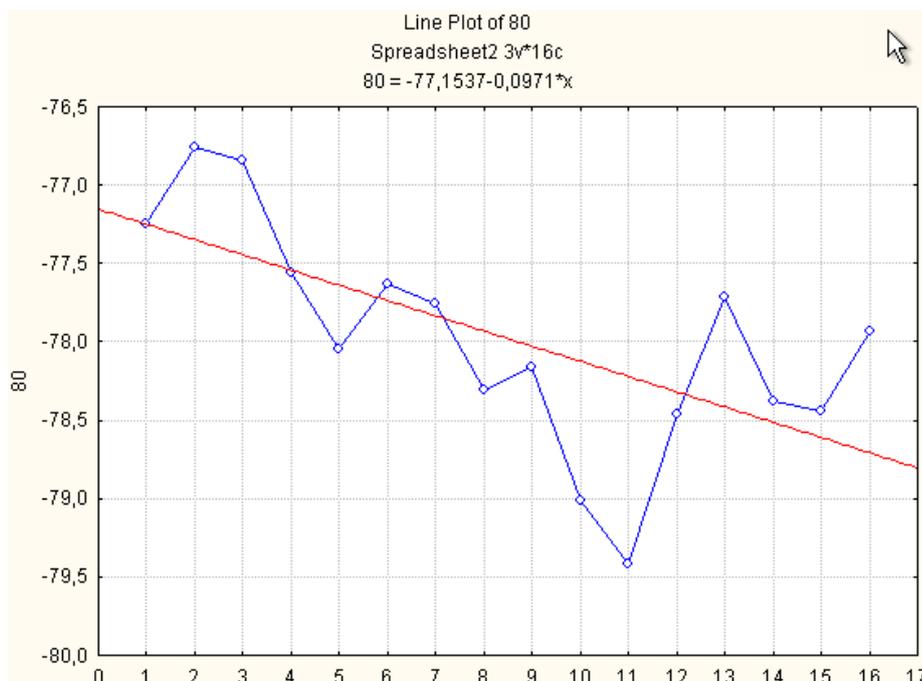


Рисунок 4.6 – Динамика уровня мощности сигнала на частоте 80МГц



Рисунок 4.7 – Динамика уровня мощности сигнала на частоте 90МГц

Сопоставление среднего за сутки уровня сигнала при различных частотах приведено на рисунке 4.8. Видно, что на частоте 90 МГц уровень мощности ниже на 20 дБ, чем на частотах 50МГц и 80МГц.

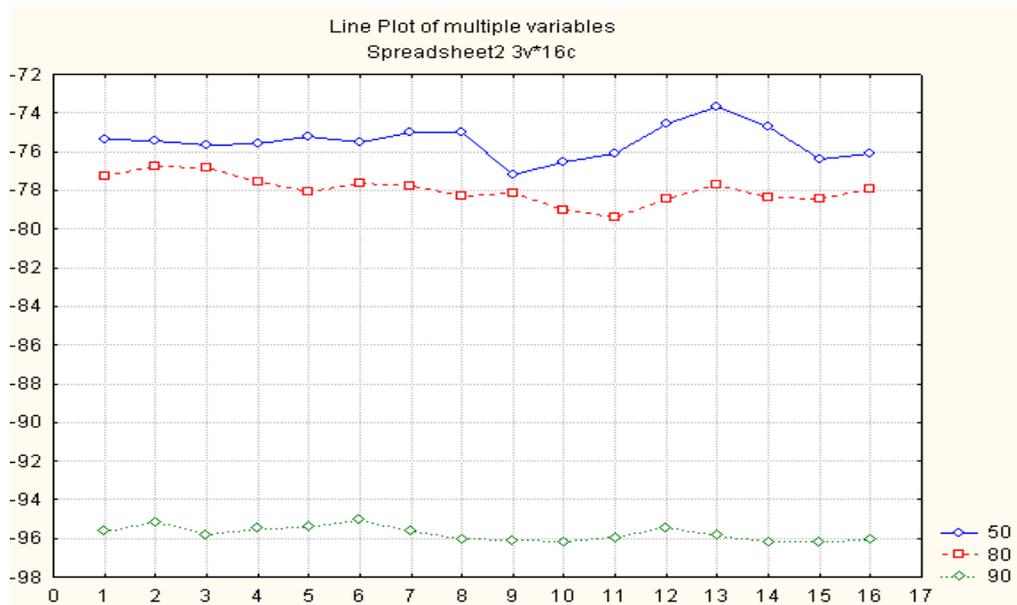


Рисунок 4.8- Колебания средних значений уровня мощности за 16 дней на разных частотах

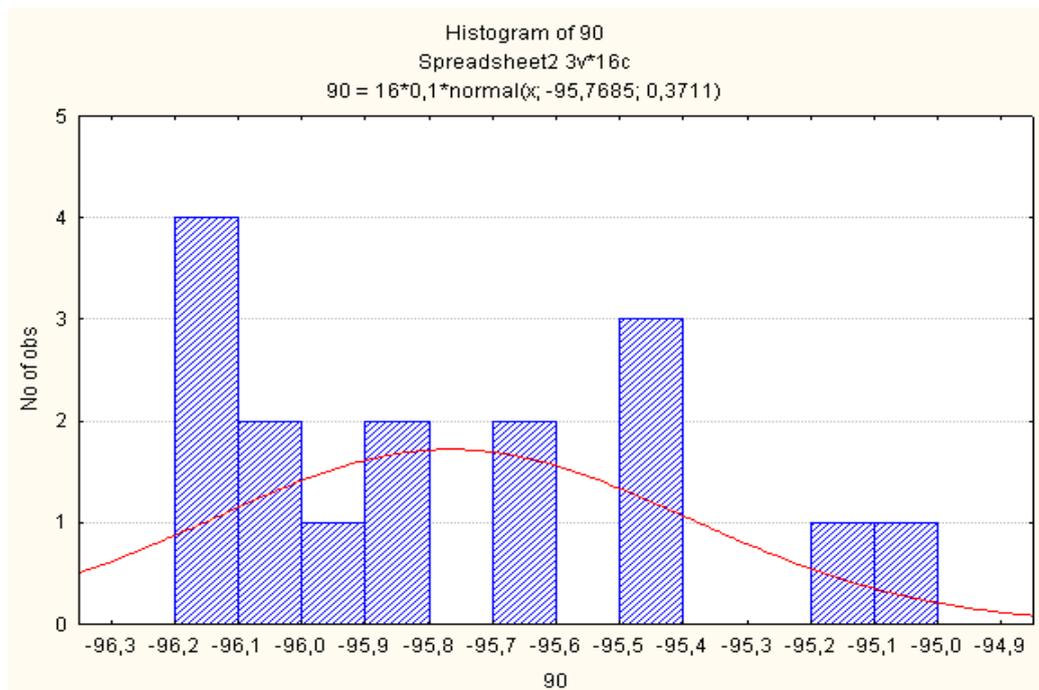


Рисунок 4.9 – Результаты обработки измерений на частоте 90МГц в сравнении с нормальным распределением

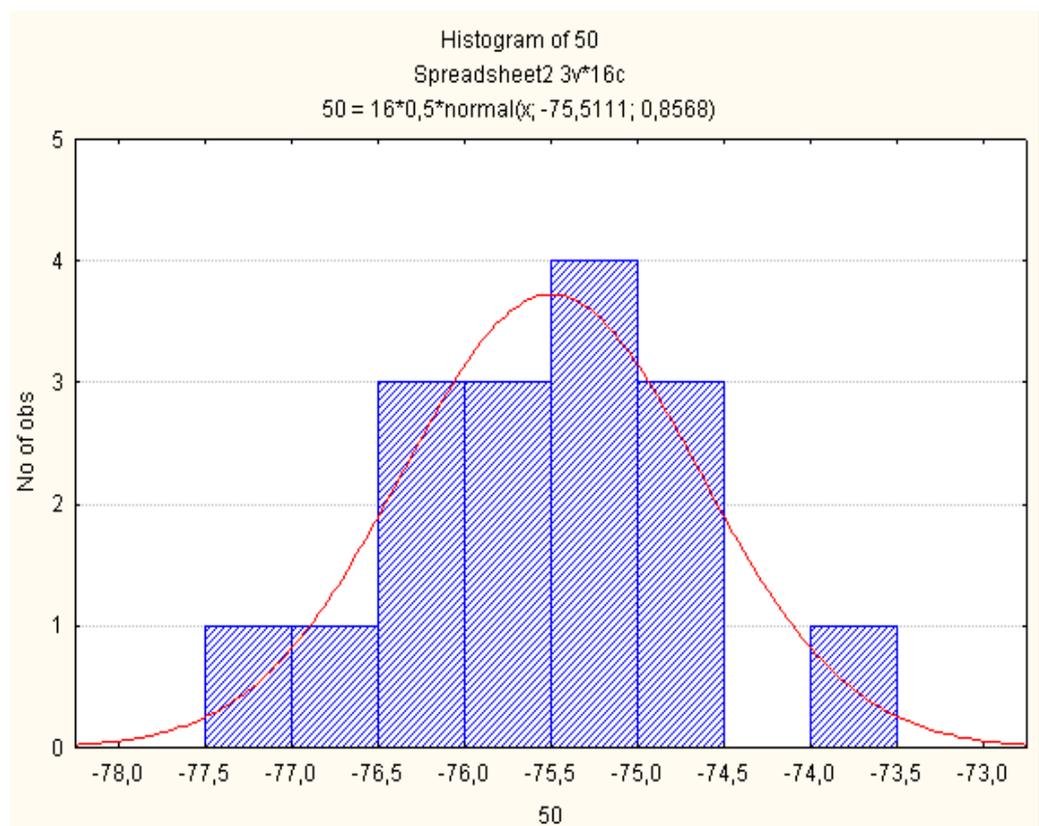


Рисунок 4.10 – Результаты обработки измерений на частоте 50МГц в сравнении с нормальным распределением

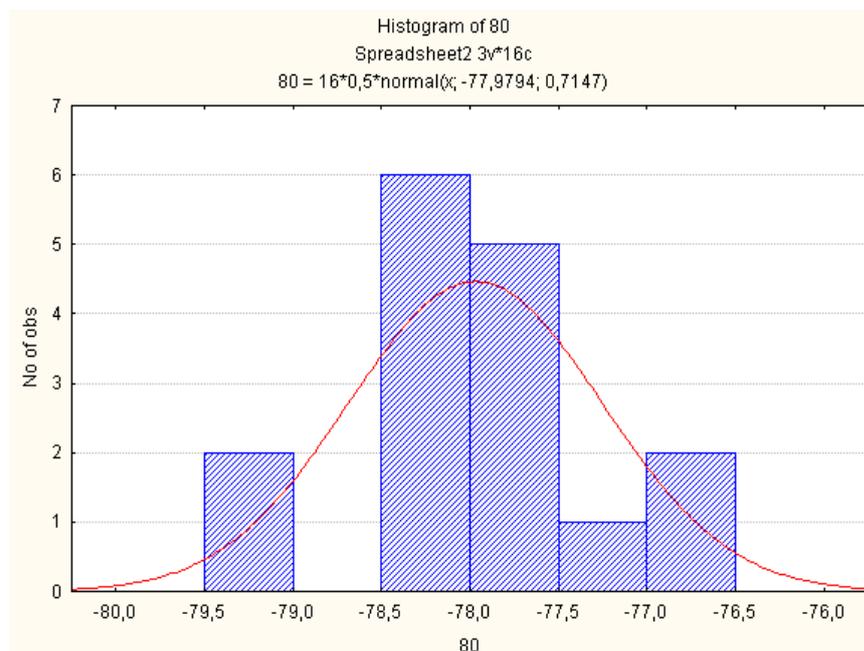


Рисунок 4.11 – Результаты обработки измерений на частоте 80МГц в сравнении с нормальным распределением

Гистограммы распределения частот среднего за сутки уровня мощности сигнала при различных частотах показаны на рисунках 4.9-4.11. Из анализа гистограмм видно, что значения уровня мощности сигнала, усредненные за 16 суток, на частотах 80МГц и 90МГц подчиняются нормальному закону.

Анализ результатов обработки результатов измерений показывает, что уровни средние уровни сигнала лежат в следующих пределах:

на частоте 50МГц  $P_{50} = -75,511 \pm 0,688$  дБ;

на частоте 80МГц  $P_{50} = -77,979 \pm 0,479$  дБ;

на частоте 90МГц  $P_{50} = -95,769 \pm 0,129$  дБ.

В таблице 4.3 приведены нормы на плотность мощности электромагнитного поля в населенных пунктах. Существуют международные нормы такие как ICNIRP, IEEE и национальные.

Таблица 4.3 – Нормы на плотность мощности электромагнитного поля

Организация	ICNIRP Вт/м <sup>2</sup>	IEEE Вт /м <sup>2</sup>	Казахстан Вт /м <sup>2</sup>
3-10 MHz	$9\ 000/F^2$		0,26
10-12 MHz	$9\ 000/F^2$	2	0,26
12-30 MHz	$9\ 000/F^2$	2	0,26

30-60 MHz	10	2	0,024
60-100 MHz	10	2	0,024
1.55-2 GHz	F/30	F/40	0,1

Так как измерения проводились в дБ, необходимо пересчитать значения в Вт/м<sup>2</sup>, для сравнения с нормативными значениями. пересчет проводится по следующей формуле:

$$S = 10^{\left[\left(\frac{P_{ИЗМ}-G_a}{1000}\right) \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)\right]}, \quad (4.1)$$

где: P<sub>ИЗМ</sub> – измеренный уровень мощности, дБ;

G<sub>a</sub>- коэффициент усиления антенны, дБ;

λ - длина волны, м.

Подставив данные измерений получим:

$$S_{80} = 10^{\left[\left(\frac{P_{ИЗМ}-G_a}{1000}\right) \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)\right]} = 10^{\left[\frac{(-75,51-5)}{1000} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3,14}{50 \cdot 10^6}\right)\right]} = 6,44 \cdot 10^{-8}, \text{ Вт/м}^2.$$

$$S_{80} = 10^{\left[\left(\frac{P_{ИЗМ}-G_a}{1000}\right) \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)\right]} = 10^{\left[\frac{(-77,79-5)}{1000} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3,14}{80 \cdot 10^6}\right)\right]} = 1,51 \cdot 10^{-10}, \text{ Вт/м}^2.$$

$$S_{90} = 10^{\left[\left(\frac{P_{ИЗМ}-G_a}{1000}\right) \cdot \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)\right]} = 10^{\left[\frac{(-95,77-5)}{1000} \cdot \left(\frac{4 \cdot 3,14}{90 \cdot 10^6}\right)\right]} = 8,67 \cdot 10^{-13}, \text{ Вт/м}^2.$$

Результаты занесем в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета

Частота	S, Вт/м <sup>2</sup>
50MGz	6,44E-08
80MGz	1,51E-10
90MGz	8,67E-13

Полученные величины меньше указанных в таблице 4.4 норм, то есть плотность мощности электромагнитных колебаний ниже нормы.

Из анализа гистограмм видно, что значения уровня мощности сигнала, усредненные за 16 суток на частотах 80МГц и 90МГц распределены по нормальному закону.

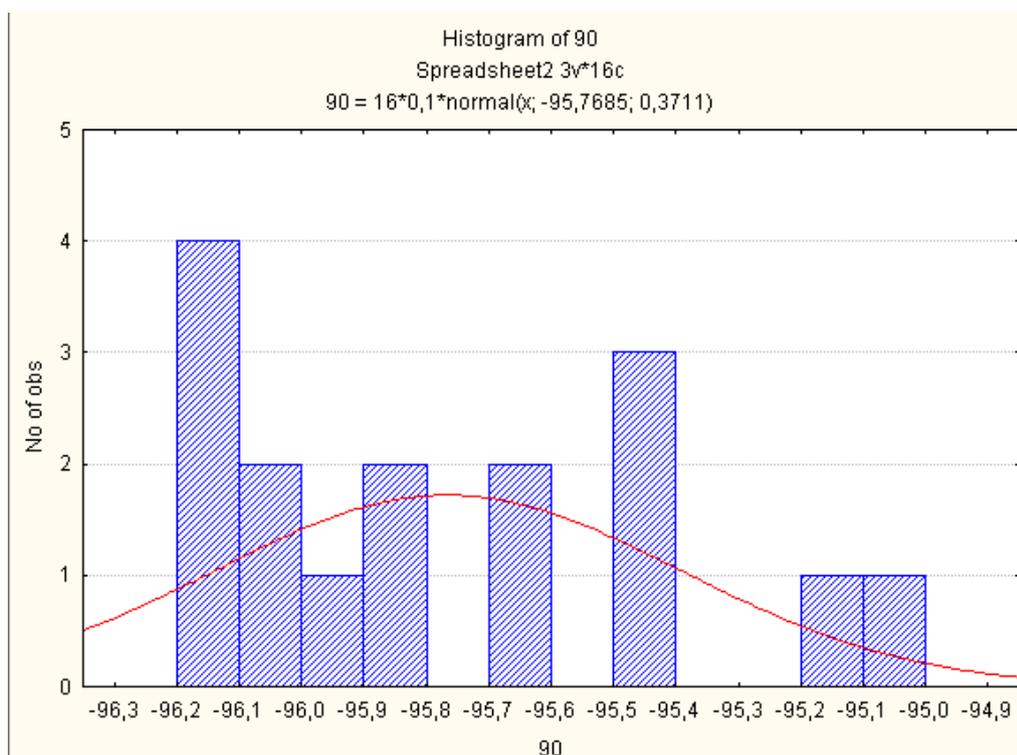


Рисунок 4.12 – Результаты обработки измерений на частоте 90МГц в сравнении с нормальным распределением

В экспериментальной части работы проводятся измерения ЭМ полей, с помощью многоканального анализатора спектра «Барс».

Измерения проводились в различные периоды времени.

Измерения проводятся в автономном режиме. Настраивается диапазон частот и периодичность измерений. Данные записываются в файлы и папки с указанием даты.

При проведении измерений в разные промежутки времени накапливается большое количество данных. Для обработки данных создана программа BARS ANALYS, выполняющая выборку и усреднение по частоте или дате проведения эксперимента. Программа написана на Delphi, листинг программы представлен на рисунке 4.13.

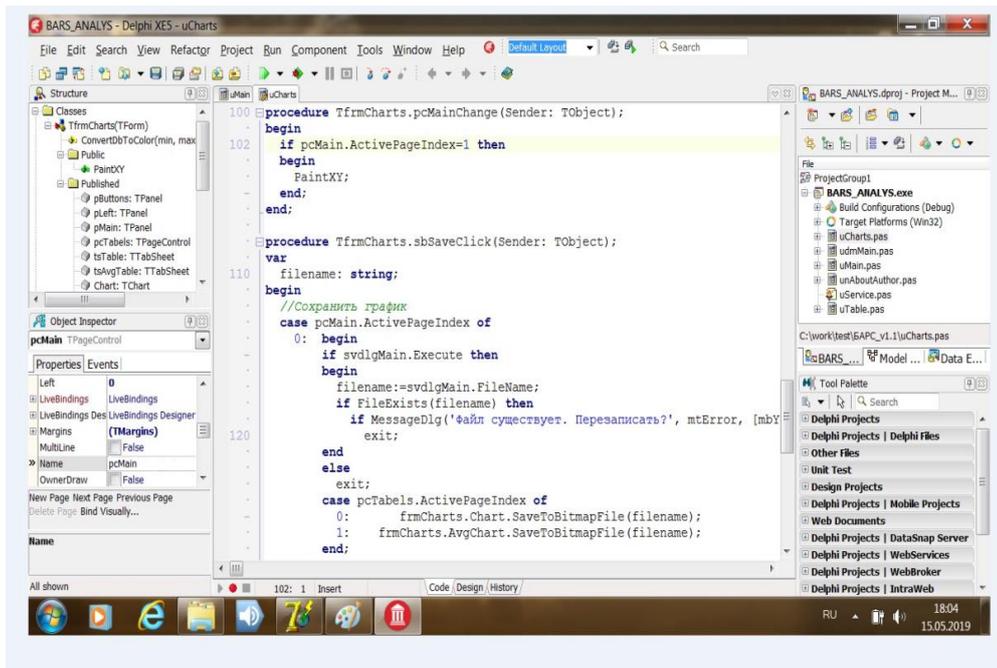


Рисунок 4.13 – Отладка программы обработки результатов

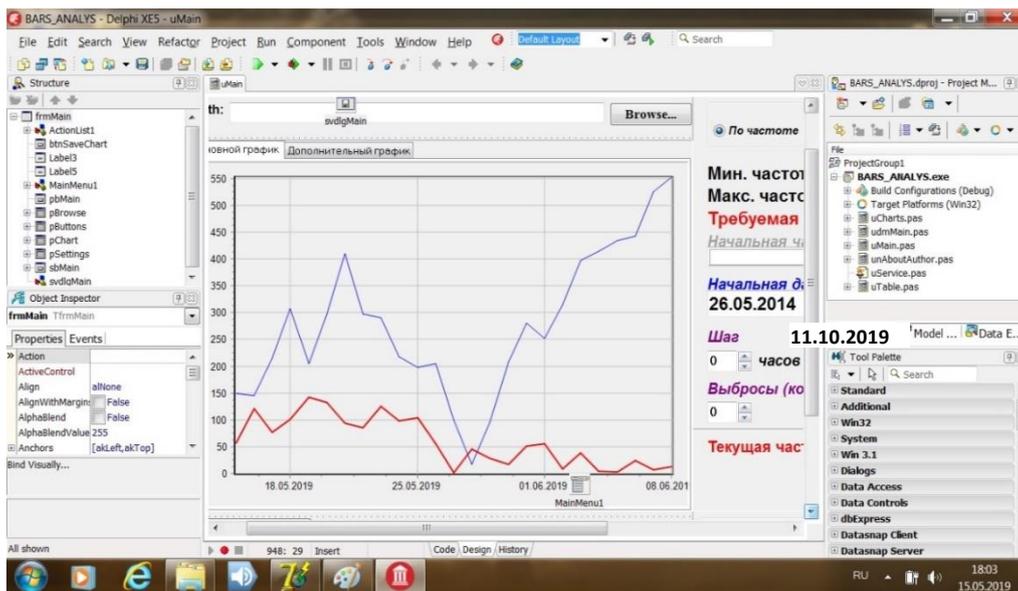


Рисунок 4.14 – Результаты работы программы

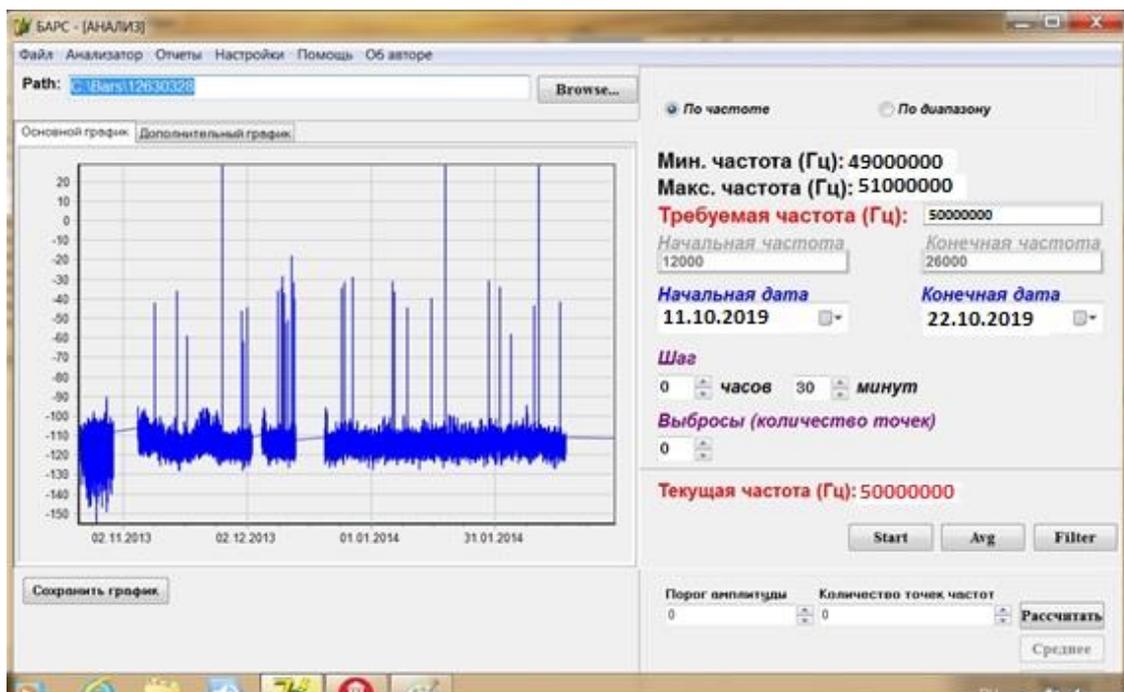


Рисунок 4.15 – Обработка результатов измерений на частоте 50 МГц

#### 4.2 Измерение радиочастотного спектра в диапазоне 2300-2400 МГц на предмет занятости в городе Алматы

Измерения радиочастотного спектра проводились с помощью спектроанализатора, путем непрерывного сканирования полосы частот 2300-2400 МГц вдоль маршрута, проложенного по главным улицам города Алматы. Места, где были обнаружены сигналы, зафиксированы.

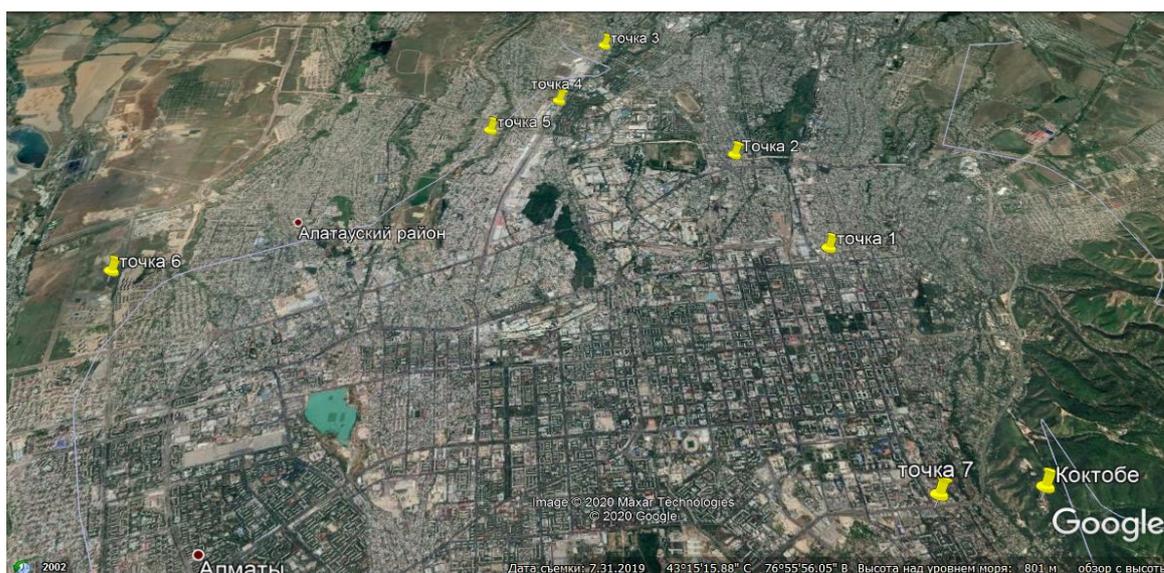


Рисунок 4.16- Маршрут проведения измерений по г.Алматы

Спектрограммы сигналов приведены на рисунках 4.17- 4. 36.

1-я точка. Координаты: 43.271536, 76.950552 (пер. пр.Райымбека и пр.Суюнбая).

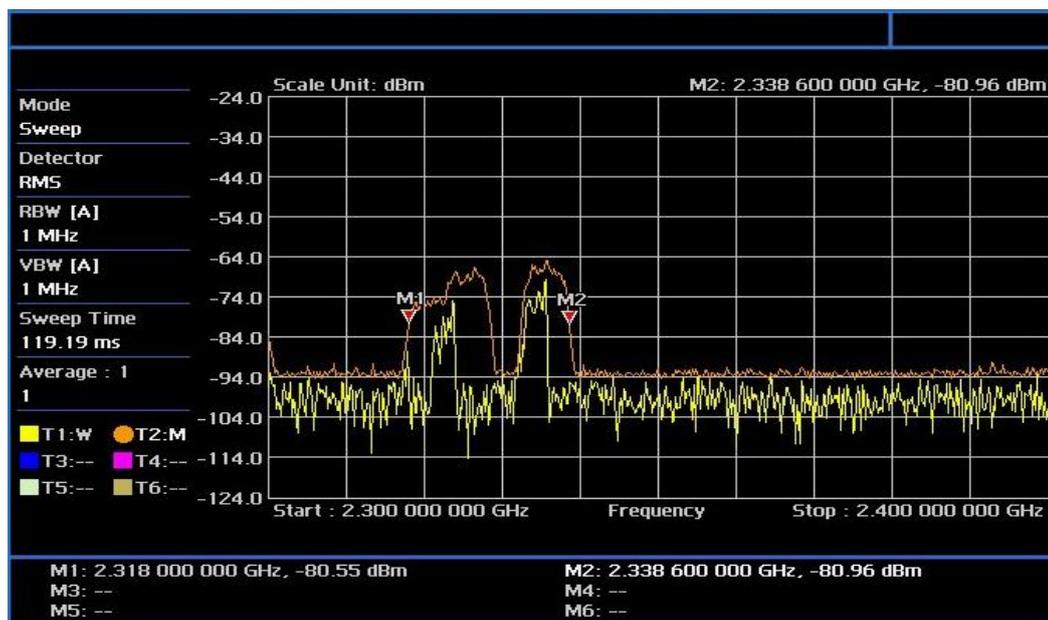


Рисунок 4.17 – Спектрограмма в точке 1

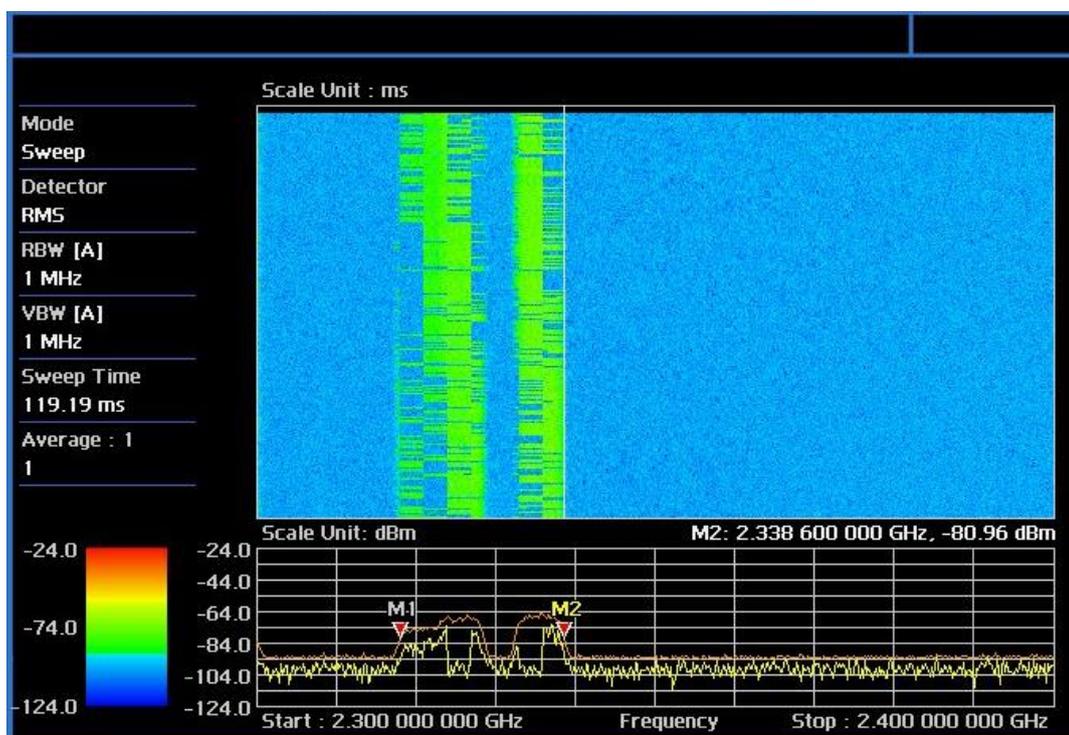


Рисунок 4.18– Развернутая спектрограмма в точке 1

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,6 МГц (2318-2338,6 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе. 2-я точка. Координаты: 43.296120, 76.933234 (ул.Жансугурова, д.211).

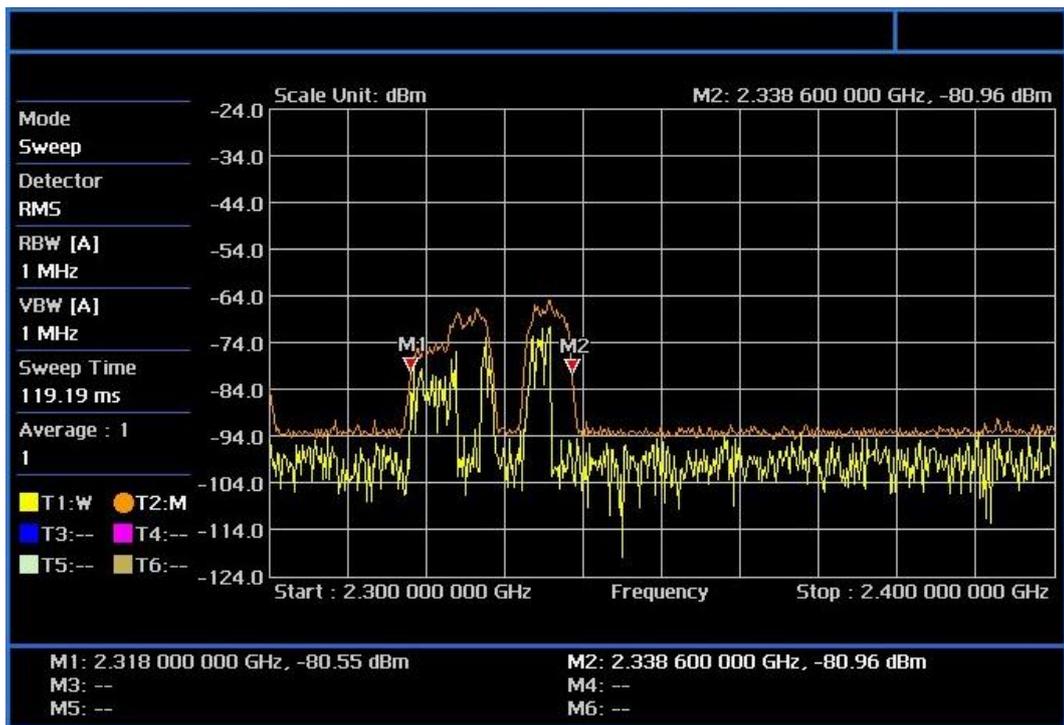


Рисунок 4.19– Спектрограмма в точке 2

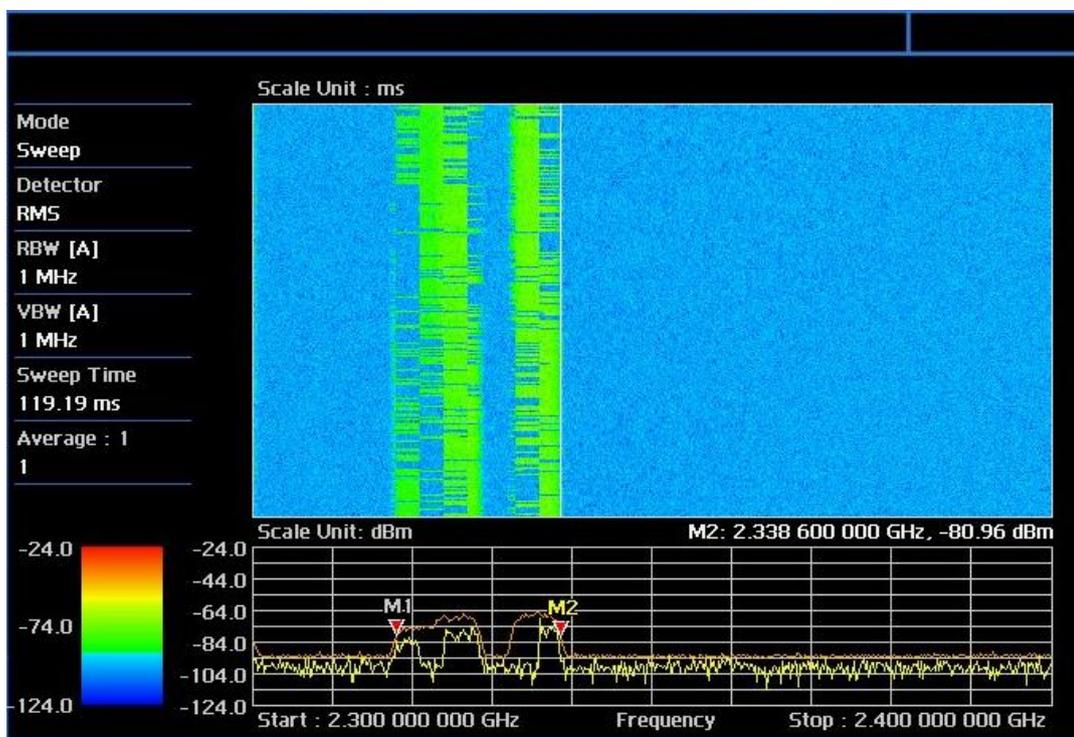


Рисунок 4.20 – Развернутая спектрограмма в точке 1

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,6 МГц (2318-2338,6 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе.

3-я точка. Координаты: 43.317886, 76.917345 (пер. ул.Палладина и ул.Жумабаева).

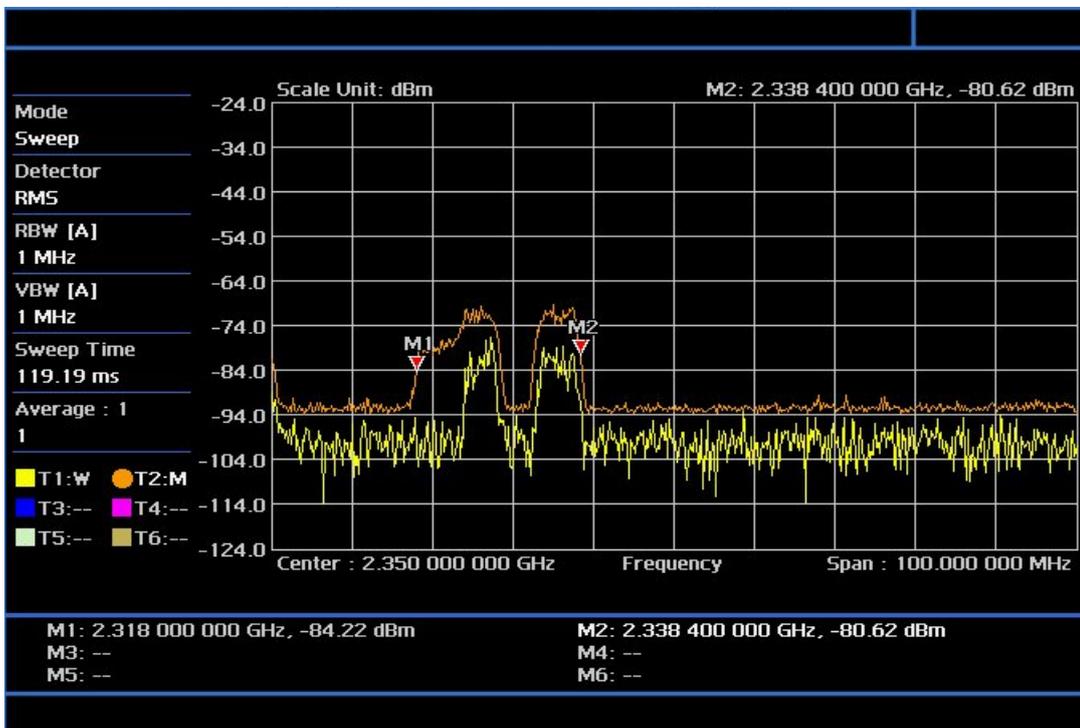


Рисунок 4.21– Спектрограмма в точке 3

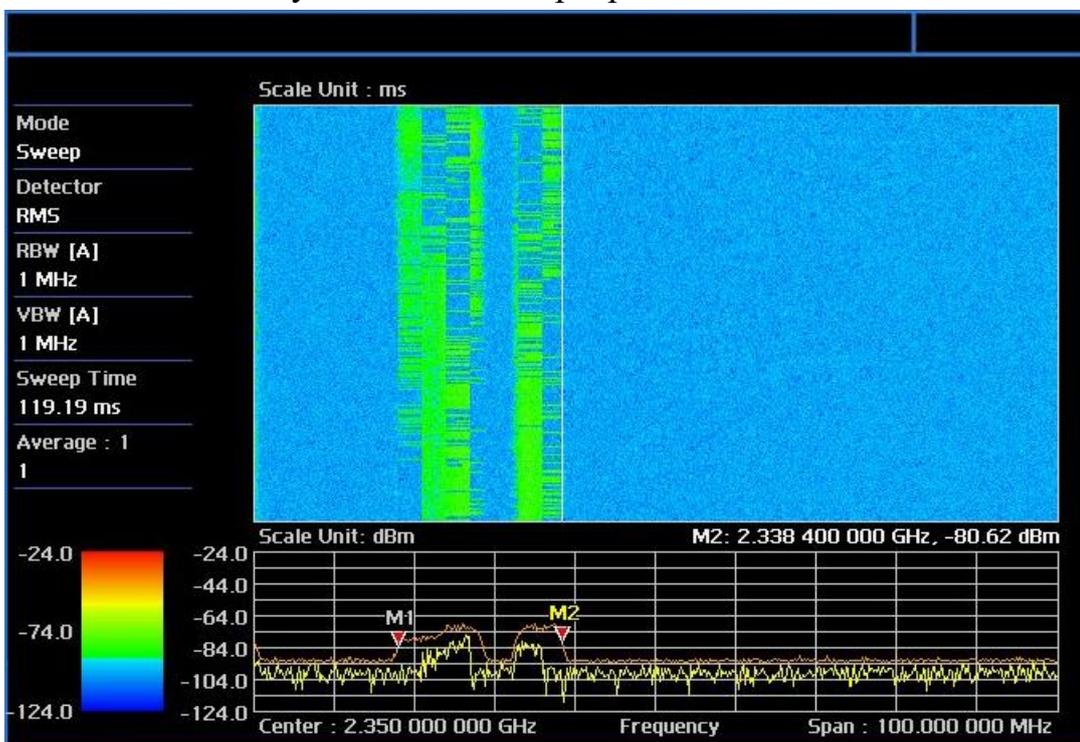


Рисунок 4.22 – Развернутая спектрограмма в точке 1

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе. 4-я точка. Координаты: 43.302561, 76.893605 (возле рынка «Ожет»).

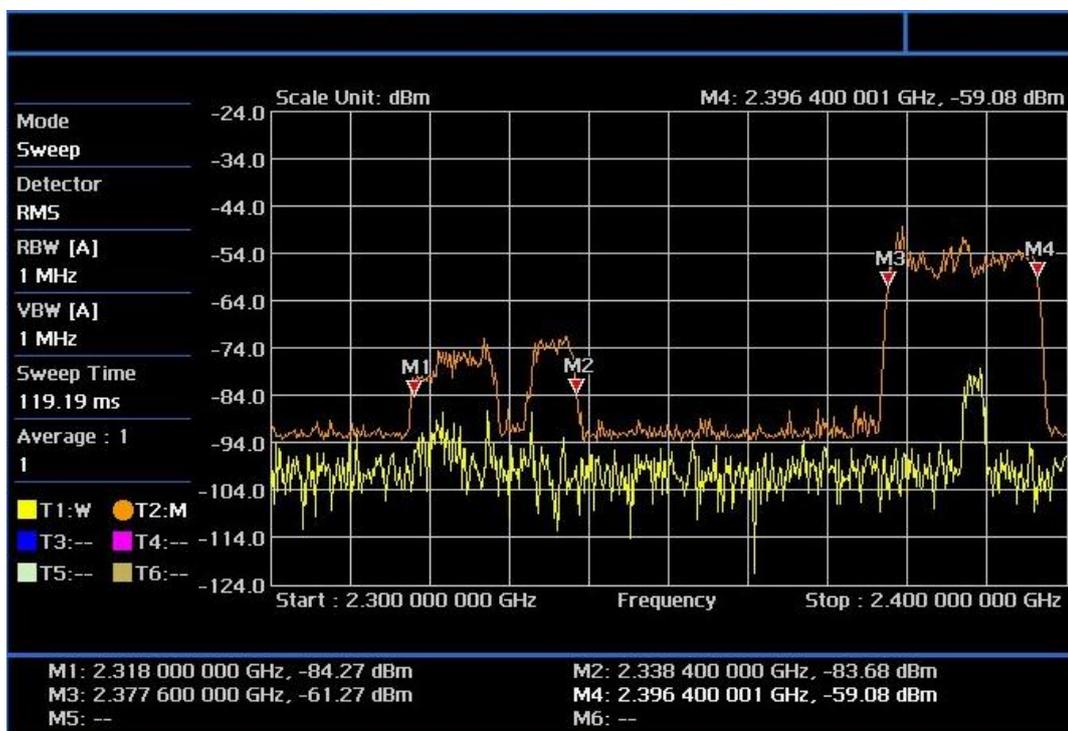


Рисунок 4.23– Спектрограмма в точке 4

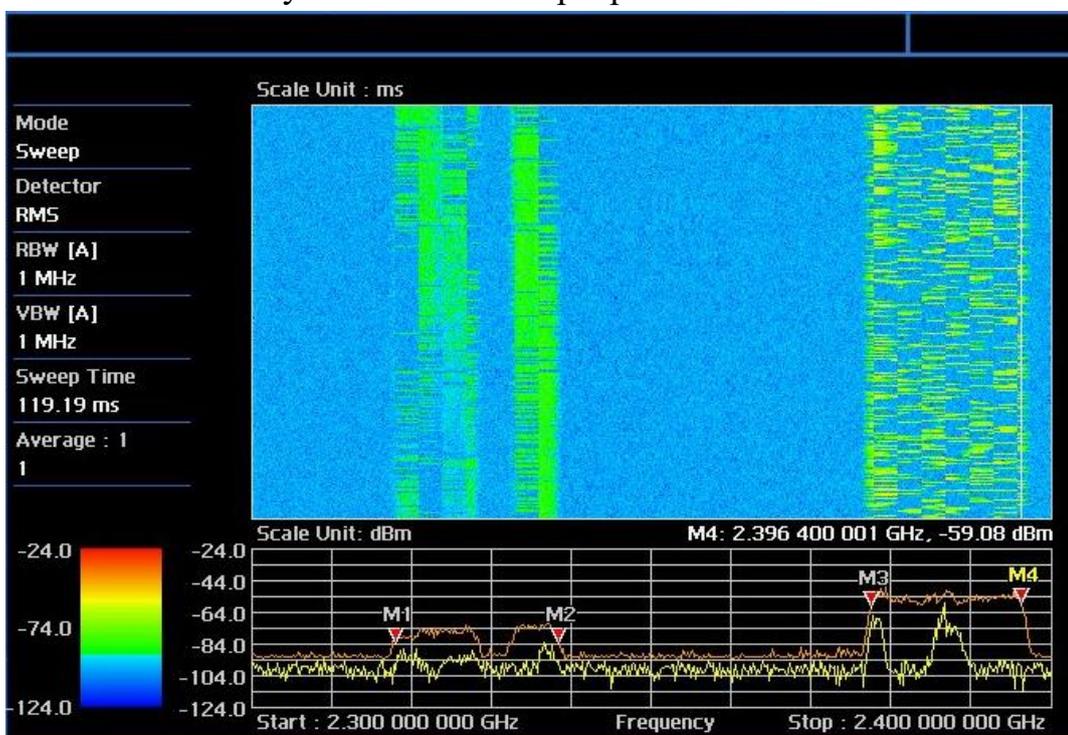


Рисунок 4.24– Развернутая спектрограмма в точке 1

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц). Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе.

В этой точке зафиксирована еще одна несущая с шириной полосы 18,8 МГц (2377,6-2396,4 МГц). Источник излучений находится в районе кольца пересечения улиц Северное шоссе и Бокейханова. Сигнал фиксируется в радиусе 2 км.

5-я точка. Координаты: 43.302654, 76.834880 (ул.Саина, возле спец.ЦОН).

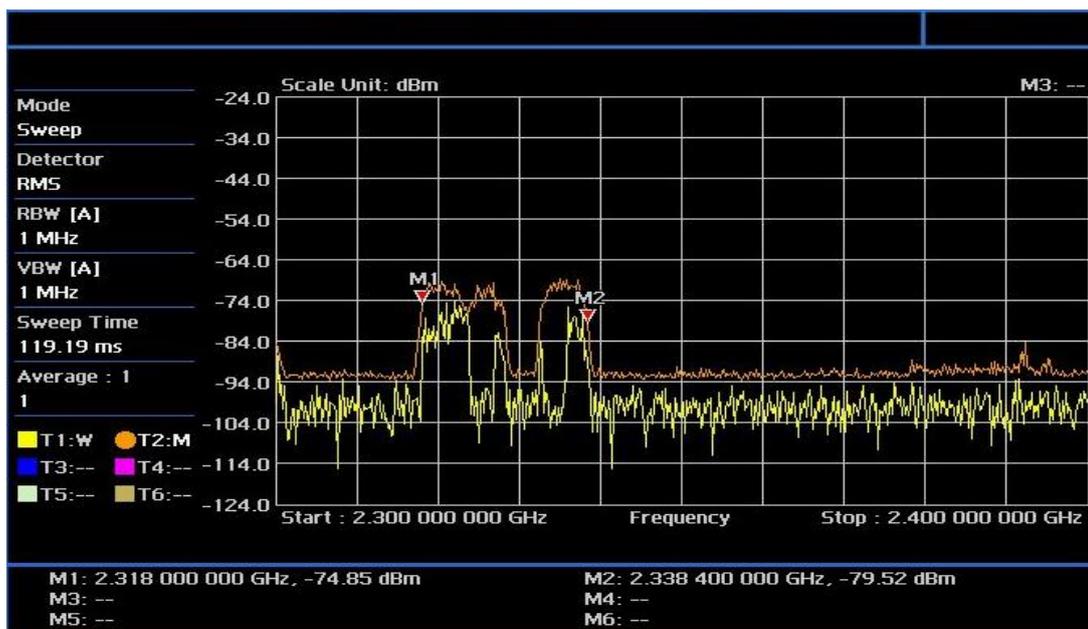


Рисунок 4.25 – Спектрограмма в точке 5

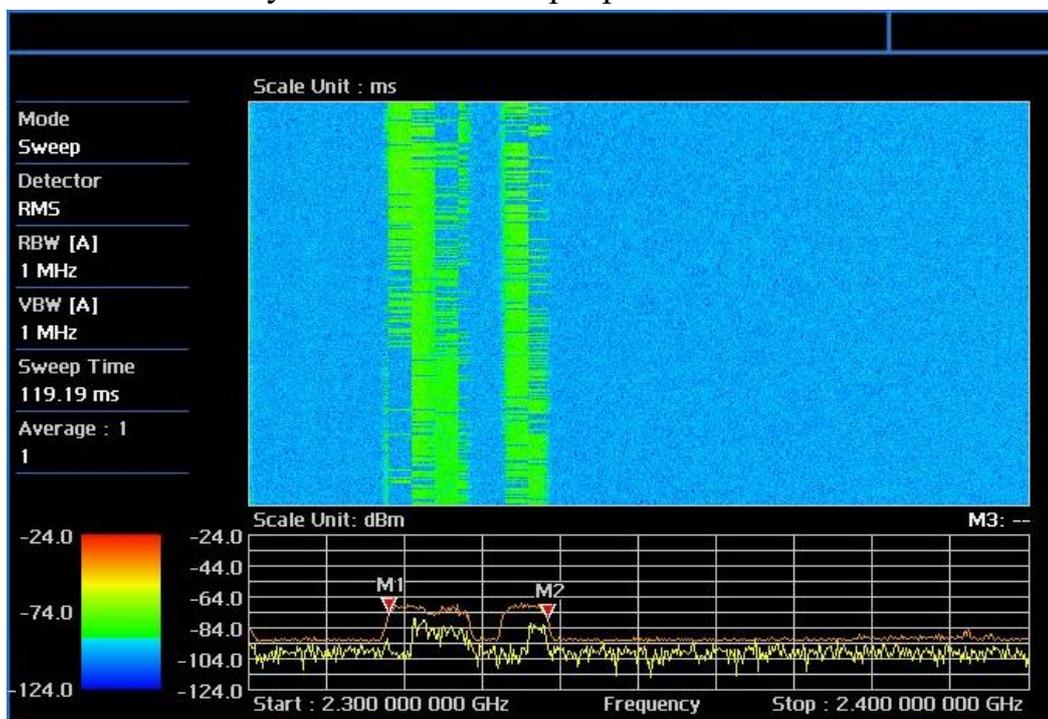


Рисунок 4.26– Развернутая спектрограмма в точке 1

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе. 6-я точка. Координаты: 43.282245, 76.816032 (пер. ул.Монке би и ул.Момышулы).

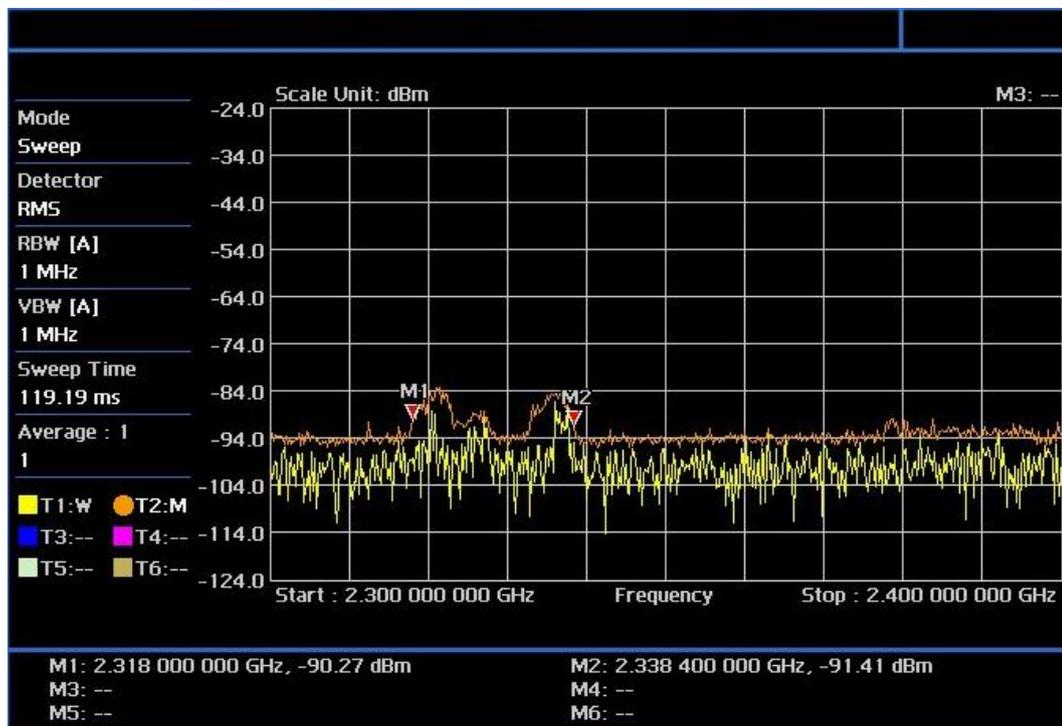


Рисунок 4.27– Спектрограмма в точке 5

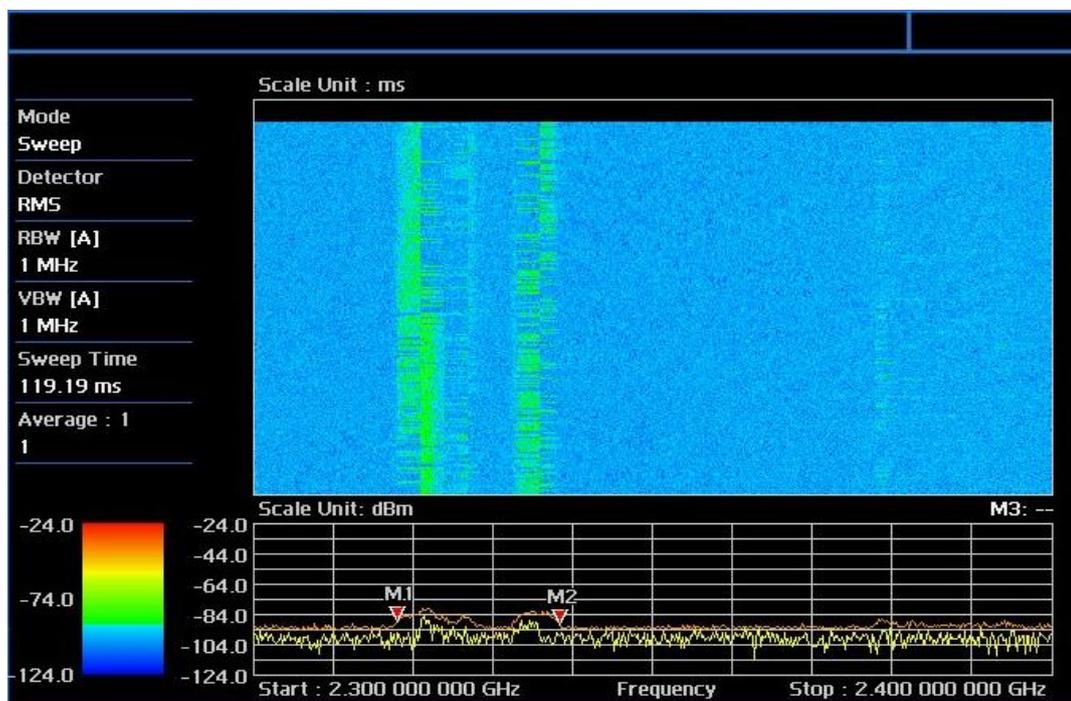


Рисунок 4.28– Развернутая спектрограмма в точке 6

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе.

Уровни сигналов слабые, так как с этой точки нет прямой видимости на вышку Кок-Тобе (мешают дома).

7-я точка. Координаты: 43.228343, 76.959996 (пер. ул. Достык и пр. Аль-Фараби).

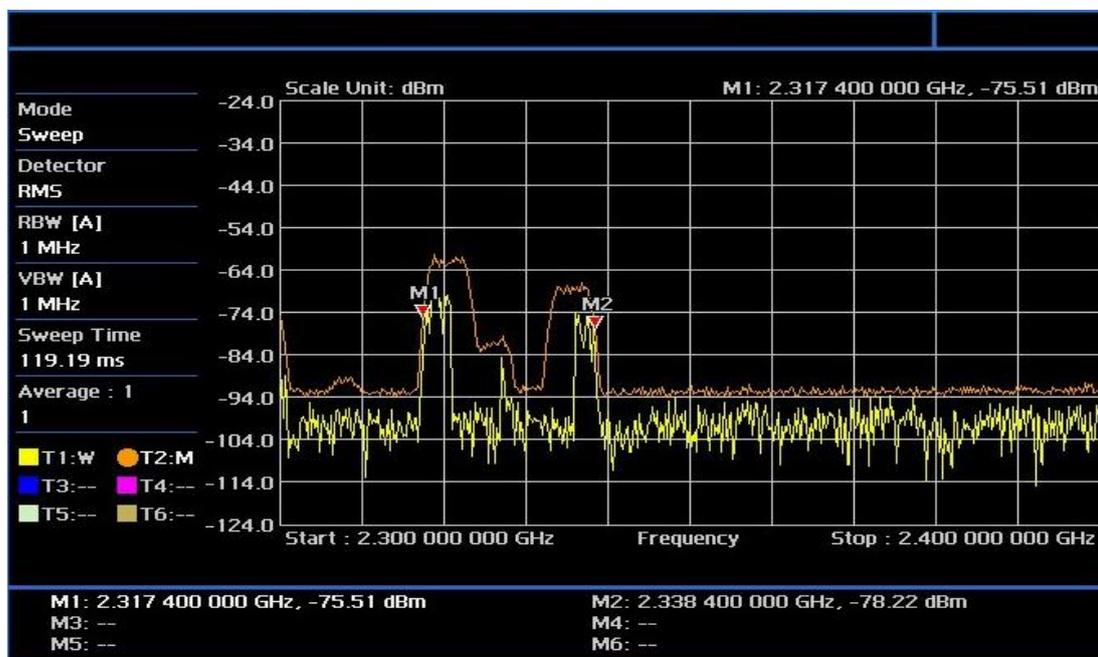


Рисунок 4.29– Спектрограмма в точке 6

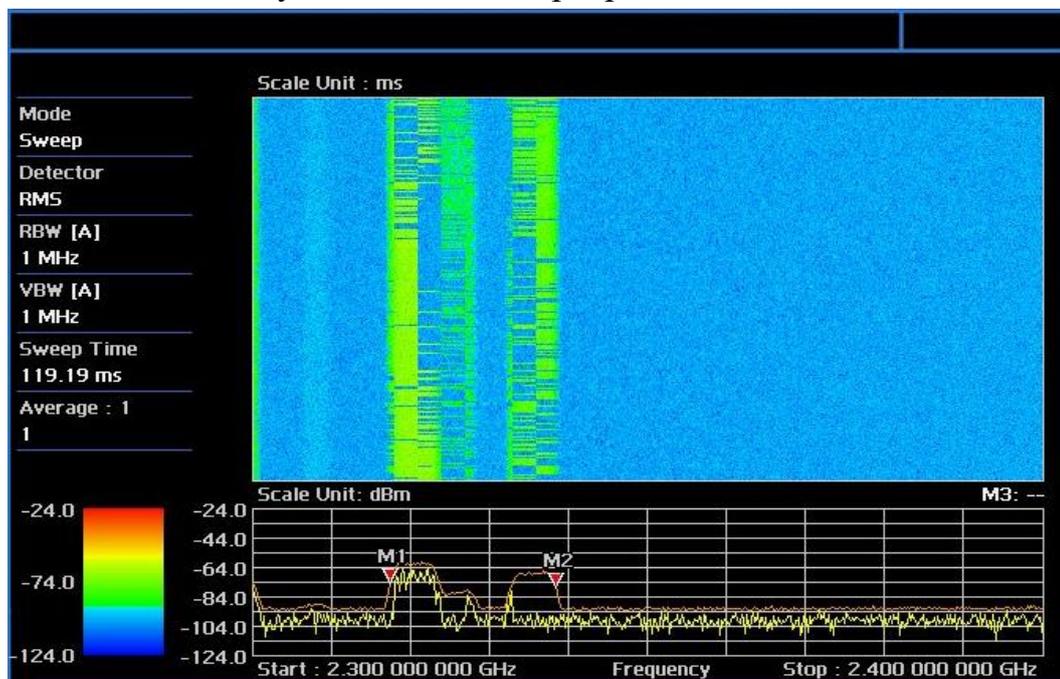


Рисунок 4.30– Развернутая спектрограмма в точке 7

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе.

8-я точка. Координаты: 43.256438, 76.967147 (пер. ул.Толе Би и ул.Кастеева).

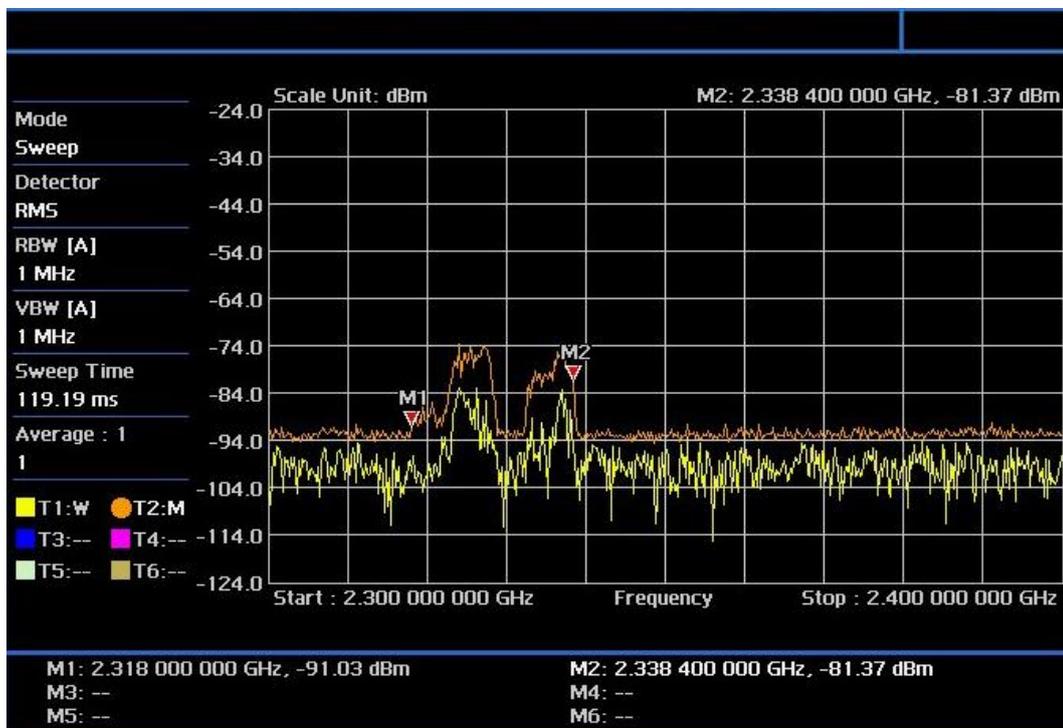


Рисунок 4.31– Спектрограмма в точке 8

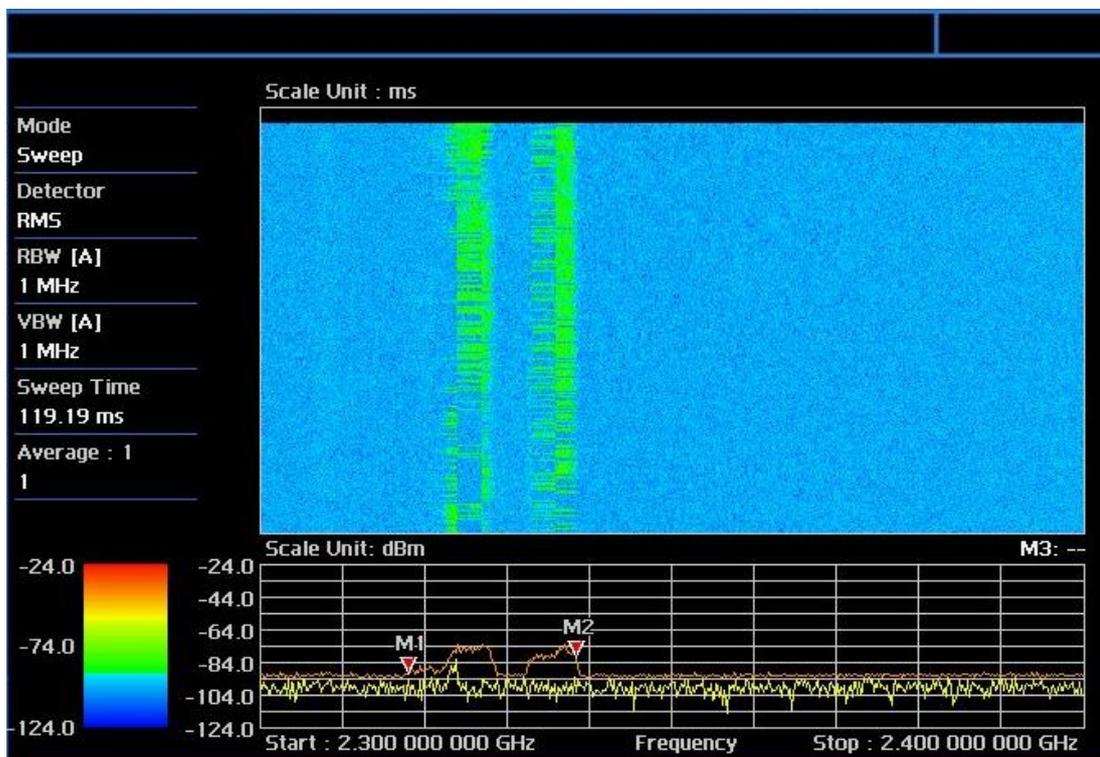


Рисунок 4.32– Развернутая спектрограмма в точке 8

Зафиксированы несущие с общей и предположительной шириной полосы 20,4 МГц (2318-2338,4 МГц).

Предположительно источники сигналов находятся на вышке Кок-Тобе.

Подробный анализ несущих.

Несущие в диапазоне 2318-2338,4 МГц.

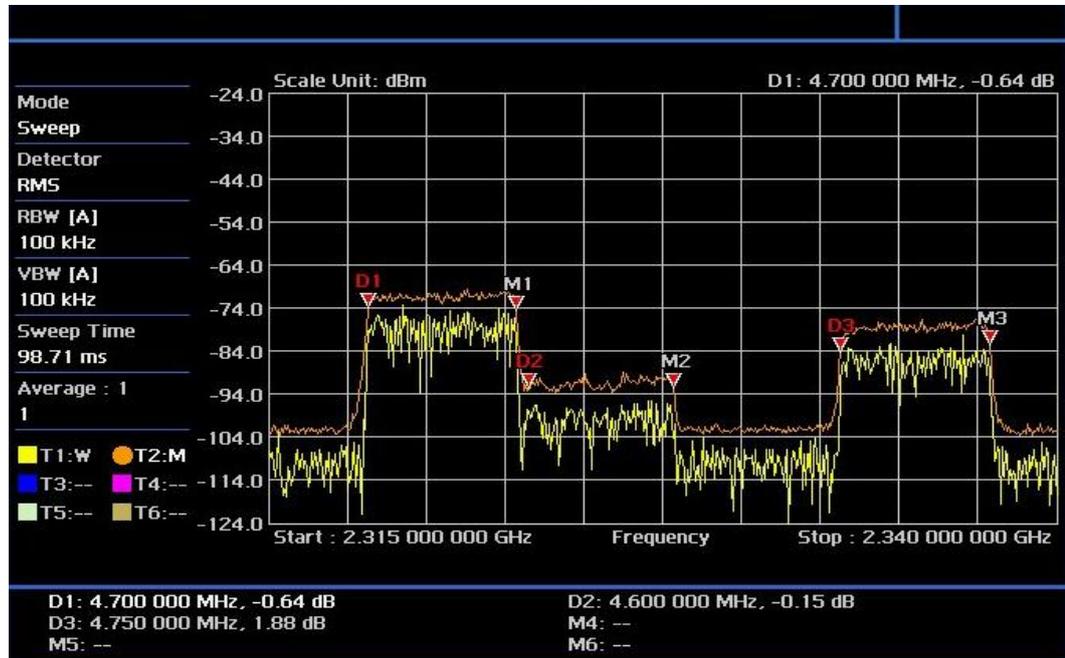


Рисунок 4.33– Спектрограмма на частотах 2318-2338,4 МГц

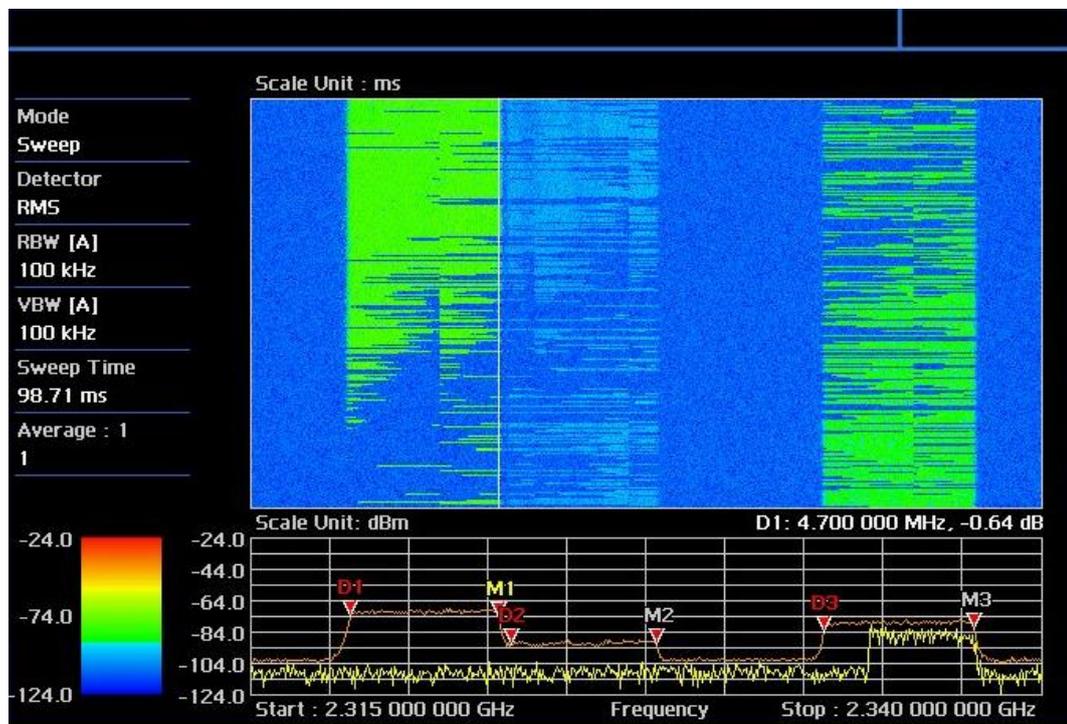


Рисунок 4.34– Развернутая спектрограмма на частотах

Спектрограммы сняты возле вышки Кок-Тобе. Как видно по спектрограммам, в диапазоне частот 2318-2338,4 МГц обнаружены 3 несущих с шириной полосы около 5 МГц.

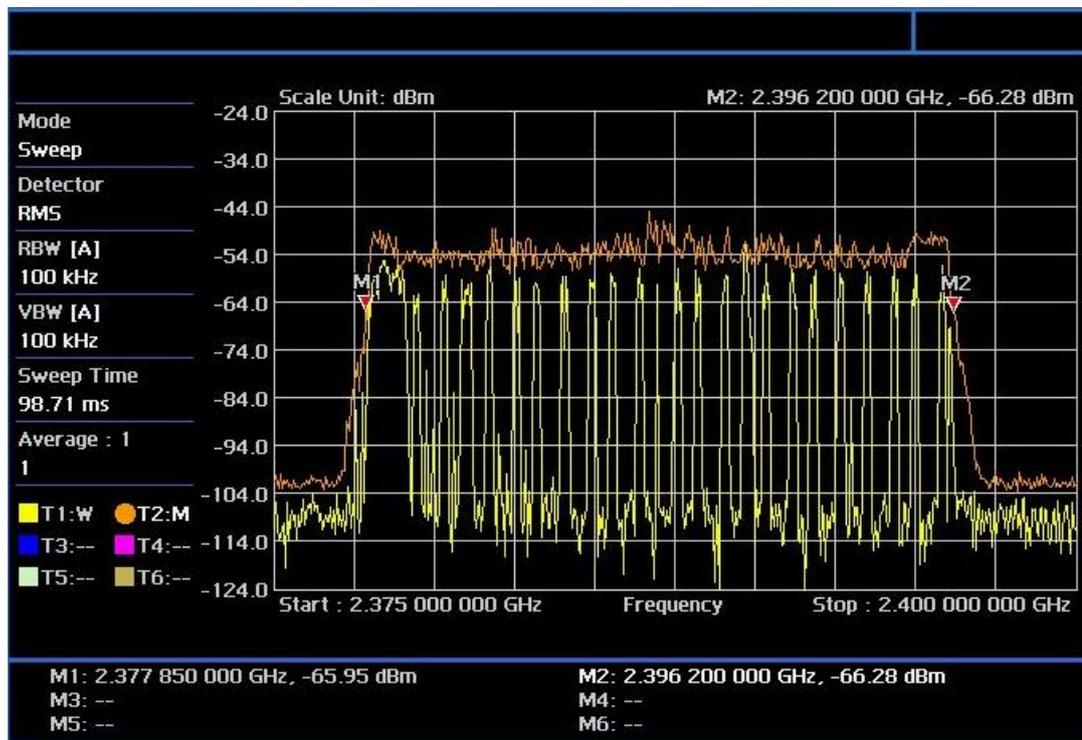


Рисунок 4.35- Несущая в диапазоне 2377,8-2396,2 МГц

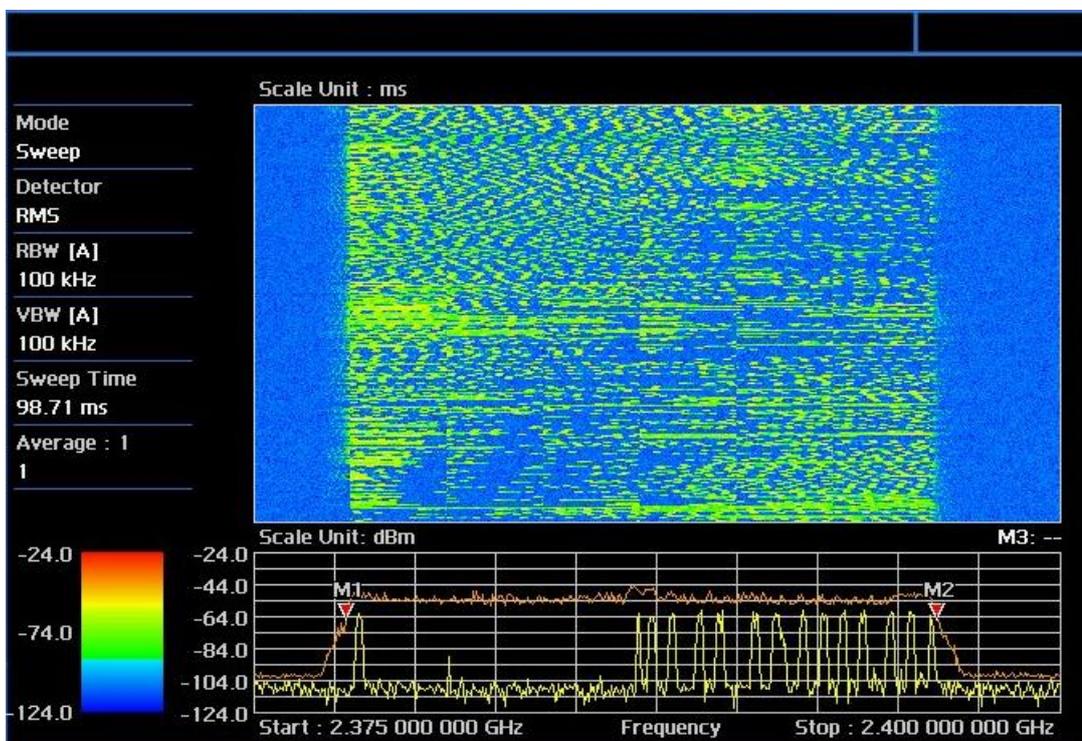


Рисунок 4.36– Развернутая спектрограмма на частотах 2318-2338,4 МГц.

Спектрограммы сняты возле кольца, на пересечении ул.Бокейхана и Северное шоссе. Обнаружена одна несущая в диапазоне 2377,8-2396,2 МГц с шириной полосы около 18,4 МГц. Предположительно источник сигнала находится в этом районе. Радиус покрытия приблизительно 2 км от указанного адреса.

Таблица 4.5 – Мощность сигнала в точках измерений

Координаты точки	Уровень мощности, дБ
43.271536, 76.950552	-69, 213
43.296120, 76.933234	-69,543
43.317886, 76.917345	- 72,632
43.302561, 76.893605	- 76, 734
43.302654, 76.834880	- 72,828
43.282245, 76.816032	- 84,932
43.228343, 76.959996	- 63,856
43.256438, 76.967147	- 76,647

Все полученные значения ниже допустимых нормами значений.

В ходе проведенных измерений радиочастотного спектра в диапазоне 2300-2400 МГц были обнаружены четыре несущих.

Три несущих с шириной полосы по 5 МГц в диапазоне 2318-2338,4 МГц зафиксированы по всему городу.

Одна несущая в диапазоне 2377,8-2396,2 МГц зафиксирована только в районе Северного кольца.

В результате проведенных измерений получены следующие результаты: полоса частот 2318-2338,4 МГц – занята по всему городу, полоса частот 2377,8-2396,2 МГц – занята частично.

## **Заключение**

Ограниченность частотного ресурса при внедрении новых систем радиосвязи требует эффективного, точного распределения частот между существующими и вновь вводимыми системами.

Оценка свободных частотных диапазонов и уровня сигналов на занятых частотах, позволят точнее рассчитать и спрогнозировать перспективные диапазоны частот для новых систем. Введение новых средств радиосвязи усложняет электромагнитную и экологическую обстановку в городе, поэтому требует постоянного контроля.

Измерения мощности электромагнитного поля проводились многоканальным анализатором спектра БАРС в различных частотных диапазонах. Полученные значения мощности сигнала на частотах 50 МГц, 80 МГц и 90 МГц ниже уровня допустимых санитарными нормами значений, то есть не наносят вред здоровью людей и не нарушают электромагнитную обстановку в районе измерений.

В результате выполненного исследования в полосе частот 2300-2400 МГц, не выделенных гражданским средствам радиосвязи обнаружены сигналы с полосой 5 МГц в диапазоне 2318-2338,4 МГц зафиксированы по всему городу и одна несущая в диапазоне 2377,8-2396,2 МГц зафиксирована только в районе Северного кольца. Значения мощности также лежат в пределах допустимых значений, но использовать эти частоты для вновь вводимых систем не возможно.

## Список литературы

1. РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R BS.1698 Оценка полей от наземных радиовещательных передающих систем, работающих в любых полосах частот, для определения воздействия неионизирующего излучения (Вопрос МСЭ-R 50/6)
2. Скрынников В.Г. Оценка ЭМС при внедрении перспективных радиотехнологий // Электросвязь. – № 7. – 2011.
3. Белашов В.Ю., Асадуллин А.И. Мобильный экспериментальный комплекс для исследования электромагнитных полей естественных и искусственных источников в диапазоне 5 кГц 3 ГГц // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». Иркутск, — 2014. — Т. 1. — С. 91—94.
4. Бердников Р.С., Струмеляк А.В. Обзор подходов к нормированию воздействия электромагнитного поля на человека // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2014. — Т. 1. — С. 46—49.
5. Агеева А. Необходимость применения геоинформационных технологий при исследовании электромагнитной обстановки в городе Владивостоке // Международный Форум студентов, аспирантов и молодых ученых стран Азиатско-Тихоокеанского региона. – Владивосток, 2010.
6. Hassan Alnajjar<sup>1</sup>, Naser W Alnaser<sup>2</sup> and Waheeb E Alnaser Level of Electromagnetic Radiation Emitted from Mobile Phone Base Station during F1 Race in the Kingdom of Bahrain International Journal of Physics: Study and Research Volume 2, Issue 1. Published: September 4, 2019
7. Rafa Pawlak, Piotr Krawiec , and Juerzy Urek. On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology IEEE Access, Volume 7, 2019
8. Pedro Severo Infante, Fidel Gilart Assessment of the real public exposure to base stations over a day from instantaneous measurement RIELAC, Vol. XXXIX 2/2018 p. 1-9 Abril
9. Васильев А.В. Мониторинг и снижение негативного воздействия электро-магнитных полей в условиях Самарской области // Известия Самарского научного центра РАН. - 2014. - Т. 16, - № 4-1. - С. 250-255.
10. Струмеляк А.В. Анализ электромагнитных полей промышленной частоты в электрических сетях / Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2012. — Т. 3. — С. 85—98.
11. Об утверждении Правил присвоения полос частот, радиочастот (радиочастотных каналов), эксплуатации радиоэлектронных средств и высокочастотных устройств, а также проведения расчета электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств гражданского назначения

12. Приказ И.о. Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 21 января 2015 года № 34. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 15 апреля 2015 года № 10730. Об утверждении таблицы распределения полос частот между радиослужбами Республики Казахстан в диапазоне частот от 3 кГц до 400 ГГц для радиоэлектронных средств всех назначений.

13. Р.Д. Шеремет, С.В. Глубокова, Д.А. Гапонов О методике изучения и оценки электромагнитной обстановки при территориальном планировании муниципальных образований. Инженерный вестник Дона, №1 (2018) ([ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4792](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4792))

14. Звездина М.Ю., Шокова Ю.А., Шоков А.В. Визуализация электромагнитного поля апертурной антенны подвижной связи в рамках социально ориентированного электромагнитного мониторинга // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. 2015. № 8-9 (20)

15. IJ. S. Kazaura, IT. A. Danladi, 2Jafar Ibrahim & 2John Ohaiburo Study on Electromagnetic Field Emission from GSM Base Stations in Nigeria IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) Volume 11, Issue 6, Nov.-Dec .2016

16. В.Ю. Белашов, А.И. Асадуллин Мобильный экспериментальный комплекс для исследования электромагнитных полей естественных и искусственных источников в диапазоне 5 кГц – 3 ГГц. XXIII Всеросс. науч. конф. «Распространение радиоволн»: Материалы докладов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. Т. 1. С. 295–298.

17. Hsing-Yi Chen and Tsung-Han Lin Simulations and Measurements of Electric Fields Emitted from a LTE Base Station in an Urban Area Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2014.

18. Руководство пользователя. Программно-методический комплекс планирования и анализа радиосетей «Эфир» Версия 4.4. Москва, 2018.

19. Биржан Е. Некоторые аспекты радиочастотного обеспечения технологии 5G (IMT-2020) в Республике Казахстан. Сборник Научных трудов Энергетика, радиотехника, электроника и связь, АУЭС 2017.

20. Гапонов Д.А., Курилова А. Э. Проблемы изучения электромагнитной обстановки в городах России. Естественные и математические науки В современном мире. Сборник статей по материалам XXVI международной научно-практической конференции НП «СибАК», 2015с.198-206.

21. Скрынников В. Научный обзор: проблемы обеспечения электромагнитной совместимости современных и перспективных радиосистем сотовой связи. "Технологии и средства связи" #1, 2017.

22. Масаль, А.В. Алгоритмы энергетической оценки помех для анализа ЭМС / А.В. Масаль // Радиочастотный спектр. – 2014. – №7. – С.32 – 37

23. И. Д. Козин, и. Н. Федулина, В. Васильев, А. Проценко, В. Кирпун. Прибор контроля занятости радиоэфира. Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан серия Физико-математическая 4 (302), Июль – август 2015 г.

24. Рекомендация МСЭ-R Р.533-8 Метод прогнозирования распространения радиоволн на ВЧ (Вопрос МСЭ-R 223/3).