


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра физики
Направление подготовки 03.03.02 – Физика


ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
 Е.В. Стукова
«26» 06 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Исследование электромагнитного воздействия на технические средства и измерительную аппаратуру КЦ «Восточный»

Исполнитель

студент группы 511-об

 14.06.2019 А.В. Авращенко
(подпись, дата)

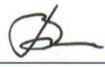
Руководитель

доцент, канд. физ.-мат. наук

 17.06.2019 И.В. Верхотурова
(подпись, дата)

Нормоконтроль

доцент, канд. физ.-мат. наук

 20.06.2019 О.В. Зотова
(подпись, дата)

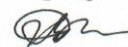
Благовещенск 2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра физики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой



Е.В. Стукова

« *dl* » ^{подпись} *Od* 2019 г,

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Авращенко Ангелины Владимировны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Исследование электромагнитного воздействия на технические средства и измерительную аппаратуру КЦ «Восточный»
(утверждено приказом от 15.04.2019 №847-уч)

2. Сроки сдачи студентом законченной работы 14.06.2019 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: программно-методический комплекс «Эфир», программное обеспечение «Аргус», эффективная излучаемая мощность передающей антенны, коэффициент усиления передающей антенны, частота излучения передающей антенны, эффективная высота принимающей антенны, высота приемной антенны, расстояние между передающей и приемной антеннами.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): провести расчет напряженности электрического поля радиоволн и его ослабления на заданной трассе по различным моделям распространения радиоволн (дифракционная, Окумура-Хата, свободного пространства и ITU-1546); провести построение профиля рельефа местности на заданной трассе; определить уровень напряженности электрического поля ра-

диосигнала от базовой станции TETRA с помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус».


5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, иллюстративного материала и т.п.) нет

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) нет

7. Дата выдачи задания 21.02.2019 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Верхотурова Ирина Владимировна, доцент, канд. физ.-мат. наук, доцент

Задание принял к исполнению (дата): 21.02.2019 г.


(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 46 с., 18 рисунков, 4 таблицы, 29 источников.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА, РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОБСТАНОВКА, НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Быстрый рост числа радиоэлектронных средств (РЭС), а соответственно, и электромагнитных излучений в окружающем пространстве приводит к тому, что очень важным является соблюдение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС при их эксплуатации в условиях существующей электромагнитной обстановки (ЭМО). Одной из задач определения условий ЭМС РЭС является расчет характеристик их электрического поля, выполненных по разным моделям распространения радиоволн.

Цель работы – определить характеристики электрического поля радиоволн от базовой станции TETRA космического центра «Восточный».

Выполнение поставленных задач проводилось согласно методикам определения характеристик электрического поля радиоволн, представленных в программно-методическом комплексе (ПМК) «Эфир».

По трем моделям распространения радиоволн определены значения напряженности электрического поля радиоволны и его ослабления на заданной трассе. Наиболее точные значения характеристик электрического поля получены по дифракционной модели. С помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус» определен уровень напряженности электрического поля радиосигнала от базовой станции TETRA в точке приема. Показано, что напряженность электрического поля в точке приема не превышает предельно допустимого значения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Литературный обзор	8
1.1 Электромагнитная совместимость РЭС	8
1.2 Модели распространения электромагнитного излучения передатчиков	12
1.3 Объекты КЦ «Восточный»	15
1.4 Комплектация пункта контроля ЭМС стационарного поста ВКИП	19
2 Объекты и методы исследования	22
2.1 Восточный командно-измерительный пункт КЦ «Восточный»	22
2.2 Методы исследования	24
3 Исследование электромагнитной обстановки между группировками РЭС КЦ «Восточный»	33
3.1 Расчет напряженности электрического поля на заданной трассе	33
3.2 Расчет ослабления напряженности электрического поля по разным моделям распространения радиоволн	39
Заключение	42
Библиографический список	43

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АС – абонентская станция;

БС – базовая станция;

ВКИП – восточный командно-измерительный пункт;

ЗС – земная станция;

КЦ «Восточный» – космический центр «Восточный»;

МСЭ – международный союз электросвязи;

НЭМП – непреднамеренная электромагнитная помеха;

ПМК – программно-методический комплекс;

ПО – программное обеспечение;

РЭС – радиоэлектронные средства;

ЭМО – электромагнитная обстановка;

ЭМП – электромагнитная помеха;

ЭМС – электромагнитная совместимость.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост числа радиоэлектронных средств (РЭС), а соответственно, и электромагнитных излучений в окружающем пространстве приводит к тому, что работа РЭС происходит в условиях непреднамеренных электромагнитных помех. Поэтому очень важным является соблюдение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС при их эксплуатации в условиях существующей электромагнитной обстановки (ЭМО), что обеспечит удовлетворительное качество функционирования каждого отдельного РЭС.

Одной из задач определения условий обеспечения электромагнитной совместимости РЭС является исследование распространения радиоволн на заданной трассе и расчет их характеристик, выполненных по разным моделям распространения радиоволн.

Космический центр «Восточный» (КЦ «Восточный») представляет собой совокупность объектов, состоящих из нескольких группировок радиоэлектронных средств (РЭС). Базовая станция, находящаяся на Техническом комплексе, является компонентом системы радиосети, отвечающей за организацию радиосвязи между абонентскими радиостанциями, расположенными в зоне обслуживания, и оборудованием сети TETRA. Таким образом, при анализе ЭМС объектов КЦ «Восточный» электромагнитное поле, создаваемое базовой станцией, необходимо рассматривать как возможный источник помех для РЭС находящихся на других объектах космодрома и попадающих в зону покрытия этой станции.

Цель работы – определить характеристики электрического поля радиоволн от базовой станции TETRA космического центра «Восточный».

Для достижения цели необходимо выполнение следующих задач:

1) провести построение профиля рельефа местности и определить уровень напряженности электрического поля радиосигнала от базовой станции TETRA с помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус»;

2) провести расчет характеристик электрического поля радиоволн на заданной трассе по разным моделям распространения радиоволн.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Электромагнитная совместимость РЭС

Технический прогресс приводит к большей концентрации радиоэлектронных средств (РЭС) на меньшей площади, что приводит к их взаимному воздействию друг на друга и связанного с этим нарушениям их стандартного функционирования. Поэтому все большее значение для обеспечения требуемого качества функционирования РЭС приобретают электромагнитная совместимость РЭС и контроль электромагнитной обстановки [1].

В связи с этим определим основные понятия, связанные с электромагнитной совместимостью РЭС и контролем электромагнитной обстановки.

Радиоэлектронные средства (РЭС) – это техническое средство, состоящее из одного или нескольких радиопередающих и (или) радиоприемных устройств и вспомогательного оборудования [2].

При функционировании РЭС возникают возможные нежелательные электромагнитные связи, определяемые характеристиками технического средства, не связанные с основным функциональным назначением данного средства. Поэтому нормированию должны подвергаться не только основные характеристики РЭС, но также должны охватываться и характеристики, влияющие на ЭМС. Отбор данных характеристик, основывается на анализе возможных причин появления помех и путей их воздействия на РЭС [2]. Взаимное влияние двух РЭС при наличии помех возникает тогда, когда их взаимное воздействие превысит допустимую величину защищенности от помех [1].

Электромагнитная обстановка (ЭМО) – совокупность электромагнитных излучений в данной точке пространства, существующих в определенных частотном и временном диапазонах [1, 2].

Любое РЭС функционирует и участвует в создании электромагнитной обстановки для других средств. ЭМО бывает внешняя или внутренняя:

– внутренняя обстановка – обстановка, создаваемая РЭС внутри технического средства и определяемая только свойствами рассматриваемой группы РЭС;

– внешняя обстановка – обстановка, которая создается отдельными РЭС различных объектов или между радиоэлектронными средствами, расположенными в определенной зоне покрытия [2].

Анализ электромагнитной обстановки позволяет выявить виды действующих помех, и их энергетические, спектральные и статические характеристики. [2].

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – способность РЭС или технического средства эффективно функционировать с заданным качеством в условиях определенной электромагнитной обстановки (ЭМО) не создавая электромагнитных помех другим РЭС [1].

Электромагнитная помеха (ЭМП) – явление, которое ухудшает или может ухудшить качество функционирования РЭС. Уровень ЭМП – значение величины ЭМП, измеренное в определенных стандартизированных условиях [1].

Непреднамеренная электромагнитная помеха (НЭМП) – помеха, которая создается источником искусственного излучения, не нарушающая качество функционирования РЭС [2].

Основным источником информации об анализируемых объектах для обеспечения их ЭМС принадлежит экспериментальным методам исследований. Целью, которых являются следующее [2]:

- определение соответствия характеристик излучения и приема требованиям нормативно-технической документации;
- оценка уровня воздействия непреднамеренной электромагнитной помехи (НЭМП) на технические средства в различных условиях их функционирования;
- выявление причин, приводящих к нарушению ЭМС (источников НЭМП и путей их воздействия на технические средства) [2].

Контроль ЭМО, позволяет осуществлять следующие задачи:

- измерение и контроль параметров излучения сигнала;
- распознавание радиосигнала от источника излучений [2].

К методам измерения характеристик электромагнитной совместимости относятся:

- методы измерения параметров нежелательных радиоизлучений;

– методы измерения на радиочастотном спектре радиоэлектронного средства [2].

Организационные меры, обеспечивающие ЭМС включают в себя следующее [2]:

- организационные решения;
- распределение и выделение частотного диапазона между радиослужбами;
- присвоение частот отдельным РЭС, учитывая их местоположение, режим работы;
- постановления и нормативно-технические документы, направленные на исключение или снижение до приемлемого уровня ЭМП между техническими средствами [2].

Экспертиза ЭМС включает в себя [1]:

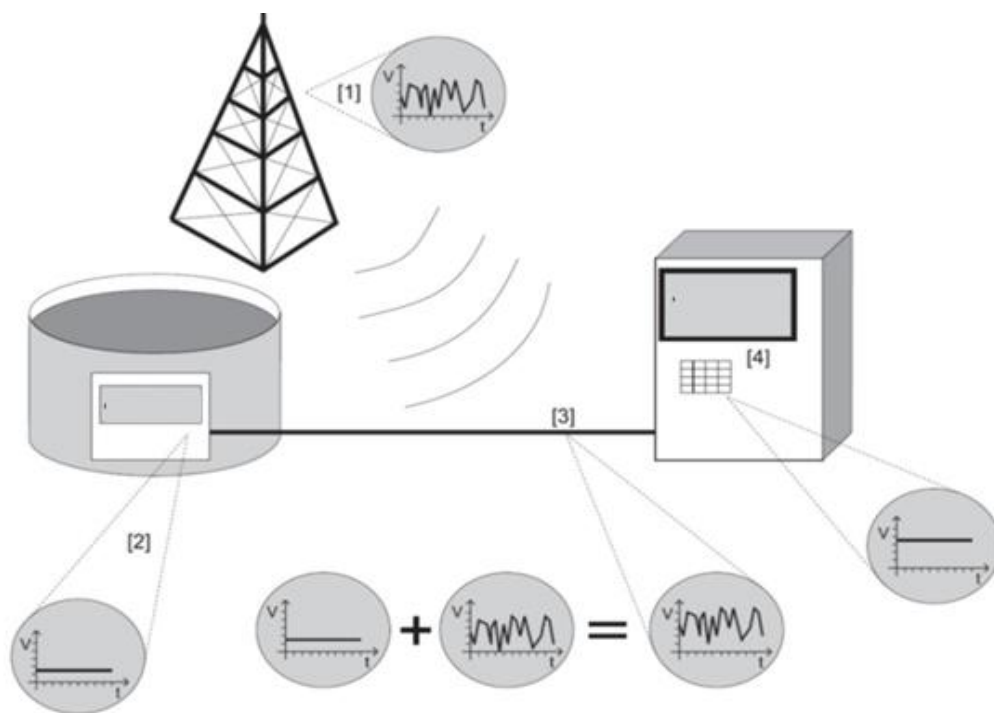
- теоретическое исследование уровня обеспечения электромагнитной совместимости РЭС в определенной электромагнитной обстановке;
- экспериментальное исследование уровня обеспечения ЭМС РЭС в определенной электромагнитной обстановке [1].

Исследование электромагнитной обстановки включает определение всех видов электромагнитных помех, существующих в заданной области распространения радиосигнала. Электромагнитная обстановка зависит не только от характеристик ЭМС технических средств и их элементов, но и от условий распространения ЭМП [2].

Условия, приводящие к возникновению помех [1]:

- существование источника помех (радиостанции, TV-станции, мобильная связь, различные природные явления);
- существование приемника помех (усилители высоких частот);
- возможность взаимодействия между ними (с помощью гальванической или электромагнитной связи) [1].

На рисунке 1 показан пример воздействия ЭМП на измерительную линию.



1 – источник помех, воздействующий на линию передачи; 2 – источник сигнала;
 3 – помеха на линии передачи; 4 – помеха на контрольном блоке.

Рисунок 1 – Пример воздействия ЭМП на измерительную линию [1]

Критерии качества функционирования РЭС при воздействии помех следующие [1].

1) Критерий А – воздействие электромагнитной помехи не должно отражаться на функциональности измерительной аппаратуры, работа которой на протяжении всего воздействия ЭМП происходит в соответствии с техническими стандартизированными условиями.

2) Критерий В – допущение временного ухудшения функционирования измерительной аппаратуры в момент воздействия ЭМП. После завершения воздействия помехи функционирование восстанавливается без вмешательства обслуживающего персонала.

3) Критерий С – допущение временного ухудшения функционирования измерительной аппаратуры в момент воздействия ЭМП с помощью обслуживающего персонала.

4) Критерий D – физический дефект измерительной аппаратуры под действием ЭМП [1].

При решении вопроса о наличии или отсутствии ЭМС производится: анализ результатов исследования ЭМО и параметров, влияющих на ЭМС; установление конкретных причин несовместимости, включая выявление источников НЭМП; установление причин распространения помех и путей их воздействия на РЭС [2].

1.2 Модели распространения электромагнитного излучения передатчиков

Радиоволны – электромагнитные волны с частотой в диапазоне от 3 кГц до 3 ТГц, являющиеся частью обширного спектра электромагнитных волн. Так как эти диапазоны обширны, то их также разбивают на участки, куда входят радиовещательные и телевизионные диапазоны, диапазоны для наземной и авиационной, космической и морской связи, для передачи данных и медицины, для радиолокации и радионавигации и т.д. Каждой радиослужбе выделен свой участок диапазона или фиксированные частоты [3].

Классификация радиоволн по диапазонам, а также области их применения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация радиоволн [3]

Название радиоволны	Диапазон длин волн	Диапазон частот	Применение
Сверхдлинные волны	100 км – 10 км	Очень низкие частоты 3 кГц – 30 кГц	Морская навигация
Длинные волны	10 км – 1 км	Низкие частоты 30 кГц – 300 кГц	Морская навигация
Средние волны	1 км – 100 м	Средние частоты 300 кГц – 3 МГц	Средневолновое и дальневолновое вещание, морская связь
Короткие волны	100 м – 10 м	Высокие частоты 3 МГц – 30 МГц	Коротковолновое вещание, коротковолновая радиосвязь
Метровые волны	10 м – 1 м	Очень высокие частоты 30 МГц – 300 МГц	Телевизионное вещание, вещание и радиосвязь в ультракоротком диапазоне
Дециметровые волны	1 м – 10 см	Ультравысокие частоты 300 МГц – 3 ГГц	Телевещание дециметровых волн, вещание и радиосвязь в ультракоротком диапазоне, сотовая связь, ДЦВ радиосвязь, GPS и ГЛОНАСС, Wi-Fi, Bluetooth

Сантиметровые волны	10 см – 1 см	Сверхвысокие частоты 3 ГГц – 30 ГГц	Спутниковое телевидение, спутниковая и космическая связь, радиолокация
Миллиметровые волны	1 см – 1 мм	Крайне высокие частоты 30 ГГц – 300 ГГц	Радиолокация и радиоастрономия

Радиоволны переносят через пространство энергию, излучаемую генератором электромагнитных колебаний. Энергия, которую несут электромагнитные волны, зависит от мощности генератора (излучателя) и расстояния до него [3]. Однако напряжённость электромагнитной волны зависит от расстояния между радиостанциями и является случайной величиной. Её изменение от точки к точке объясняется рельефом местности, а изменение с течением времени обусловлено состоянием тропосферы [4].

При распространении волн нужно учитывать следующий ряд основных факторов, влияющих на характеристики волны: экранирование радиоволны препятствием (субрефракция); усиление сигнала из-за возникновения волноводных условий распространения; отражение радиоволн от слоистых неоднородностей тропосферы; отражение радиоволн от подстилающей поверхности; ослабление в гидрометеорах; деполяризация радиоволн из-за многолучевости и дождя и др. [5].

Уровень сигнала зависит от рельефа местности и его параметров (высота, форма и взаимное расположение препятствий, наклон местности) [6].

Радиотрасса – это кратчайшее расстояние между передающей и принимающей антеннами. Выделяют два вида трасс:

- открытая трасса – трасса, для которой выполняется условие прямой видимости между базовой и абонентской антеннами;

- закрытая трасса – трасса для которой не выполняется условие прямой видимости из-за рельефа местности [7].

Классификация радиотрасс можно рассмотреть по нескольким признакам:

- по характеру радиотрассы (трассы с низко или высоко расположенными антеннами);

- по неоднородности радиотрассы (по рельефу местности, типу местности, по электрическим свойствам);
- протяженность радиотрассы (короткие, длинные);
- степень закрытия радиотрассы [7].

При расчете значения уровня сигнала в точке приема с учетом влияния рельефа местности на распространение радиоволн на конкретной трассе радиосвязи достаточно сложная задача. Тип трассы должен рассчитываться как среднее значение из нескольких типов, определенных в отдельности по каждому из критериев [8].

Одной из задач определения условий обеспечения ЭМС РЭС является исследование распространения радиоволн на заданной трассе и расчет их энергетических характеристик (напряженность и ослабление напряженности электрического поля радиоволн на рассматриваемой трассе), выполненных по разным моделям распространения радиоволн [2].

Выделяют следующие виды моделей распространения радиосигнала:

- эмпирические – достаточно сложные модели, основанные на наблюдениях за измерениями радиосигнала;
- статистические – обладают наименьшей точностью, но для расчета энергетических характеристик радиосигнала требуют меньшее количество входных параметров;
- детерминированные – наиболее точные модели, рассчитывающие потери радиосигнала с учетом большого количества параметров условий распространения радиосигналов [9].

Энергетические характеристики канала связи являются основными параметрами для определения условий обеспечения электромагнитной совместимости РЭС. Наиболее широкое практическое применение получили статистические модели расчета условий распространения радиоволн и разработки методов расчета каналов, основанные на усреднении большого количества эмпирических данных экспериментальных исследований напряженности поля. Однако статистические модели не учитывают специфических особенностей конкретных трасс [10].

Напряжённость и ослабление напряженности электромагнитного поля радиосигнала зависит от расстояния между радиостанциями и является изменяющейся величиной. Их изменение от точки к точке объясняется: типом трассы, неоднородностью электрических свойств среды (изменение которых приводит к явлению рефракции волн), наличием инфраструктуры [4, 6, 10, 11].

Модель «Свободного пространства» позволяет определить напряженность электрического поля передаваемого радиосигнала и его ослабление как функции расстояния, которые часто используют как базовый элемент в более сложных моделях, учитывающих влияние окружения на потери при распространении радиоволн (например, поглощение растительностью или газами, дифракцию, отражения и т. п.). Достоинством данной модели является очень простой вид, хотя область применения ограничена ситуациями, в которых влиянием окружения на распространение радиоволн можно пренебречь [10, 11].

Одной из первых моделей распространения радиоволн была предложена модель Окумура-Хата для прогнозирования напряженности поля по сухопутной трассе. Формулы модели получены для различных территориальных зон: город, пригородная зона, сельская местность [10].

Наиболее полной моделью для прогнозирования напряженности поля его ослабления является модель ITU-1546, которая использует как достаточное количество различных приближений и уточнений [10].

Дифракционная модель считается самой точной для расчета уровня сигнала и его ослабления, учитывая при этом дополнительные параметры излучения. Данная модель основывается на явлении дифракции волн, обеспечивая наиболее высокую точность расчета [12].

При этом получаемое значение напряженности поля и его ослабления по этим трем моделям не превышает максимального значения напряженности поля и его ослабления в свободном пространстве [4].

1.3 Объекты КЦ «Восточный»

КЦ «Восточный» состоит из нескольких объектов, содержащие в своем составе группировки РЭС различного вида и пункты контроля электромагнит-

ной совместимости.

На рисунке 2 показано местоположение основных объектов на КЦ «Восточный».



Рисунок 2 – Анализируемый участок на цифровой карте местности [13]

Объекты КЦ «Восточный».

- 1) ГП №3 – генеральный проект №3 (или стартовый комплекс, который предназначен для управления пуска космических аппаратов).
- 2) МИК КА – монтажно-испытательный комплекс космических аппаратов (предназначен для размещения технологического оборудования, сборки, входного контроля и комплексных испытаний космических аппаратов).
- 3) МИК РН – монтажно-испытательный комплекс ракеты-носителя (предназначен для размещения технологического оборудования, сборки, входного контроля и комплексных испытаний ракет-носителей).
- 4) ВКИП – восточный командно-измерительный пункт (обеспечивает траекторные измерения движения ракеты-носителя с космическим аппаратом);
- 5) Юстировочная вышка (позволяет проводить все работы по подготовке к запуску ракет-носителей с КЦ «Восточный»).

б) «Корунд» (управляются и координируются все работы подготовки и запуска космических аппаратов и перспективных космических программ) [14].

Каждый из данных объектов содержит стационарный, автономный или подвижный пункт контроля электромагнитной совместимости РЭС.

На рисунке 3 представлен автономный пункт контроля РЭО, который содержит:

- логопериодическую антенну, работающую в диапазоне радиочастот от 25 до 3000 МГц [15];
- пеленгаторную антенну с двойной поляризацией, которая работает в диапазоне радиочастот от 20 до 1300 МГц [16];
- необслуживаемую станцию радиомониторинга и пеленгования, работающую в диапазоне частот от 9 кГц до 3,5 ГГц.

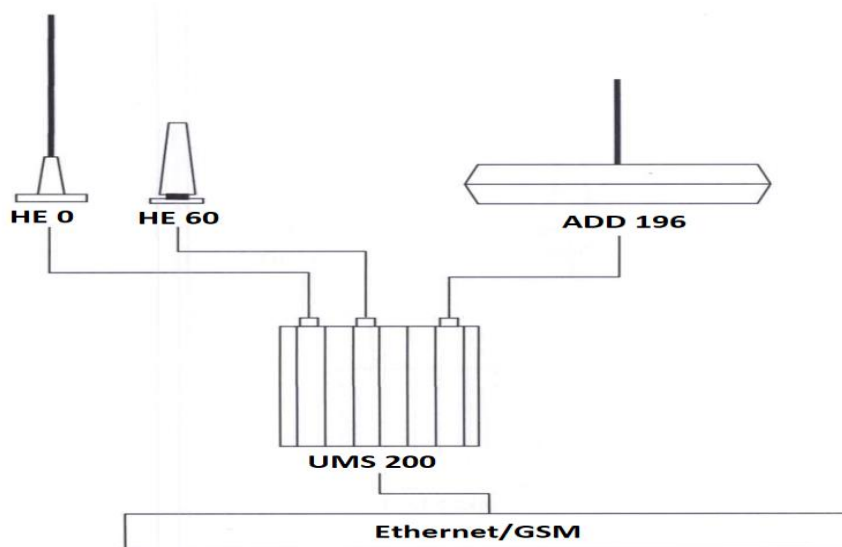


Рисунок 3 – Автономный пункт контроля РЭО [17]

На рисунке 4 представлен подвижный пункт контроля на базе микроавтобуса повышенной проходимости.

Подвижный пункт контроля содержит:

- логопериодическую антенну, работающую в диапазоне радиочастот от 25 до 3000 МГц [15];
- пеленгаторную антенну с двойной поляризацией, которая работает в диапазоне частот от 20 до 1300 МГц [16];

– техническое оборудование для мониторинга и радиопеленгации.

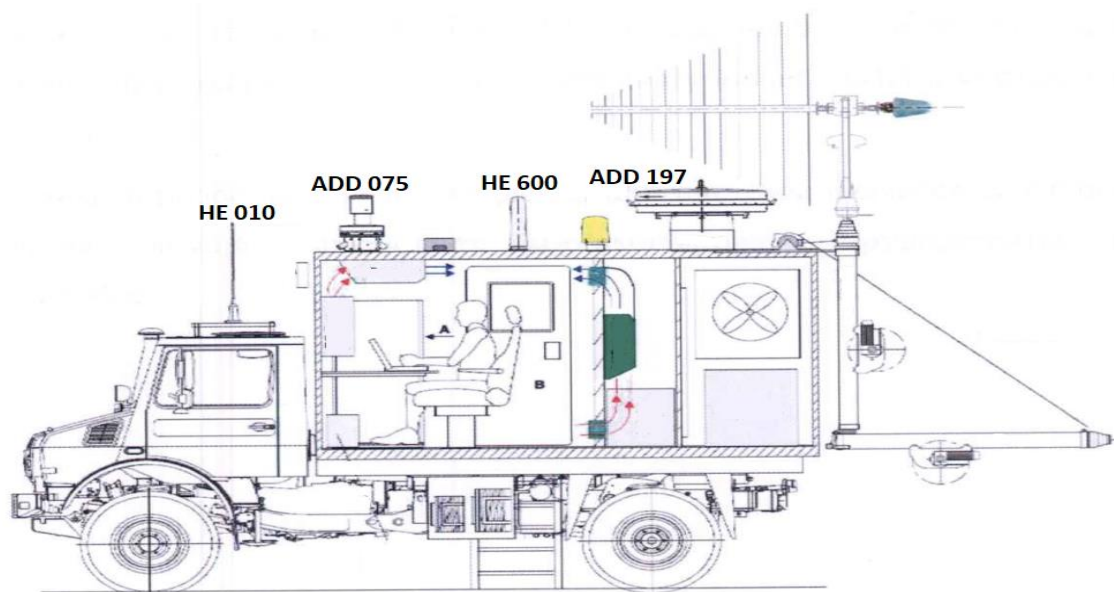


Рисунок 4 – Подвижный пункт контроля РЭО [17]

На рисунке 5 представлен стационарный пункт контроля радиоэлектронной обстановки (РЭО).

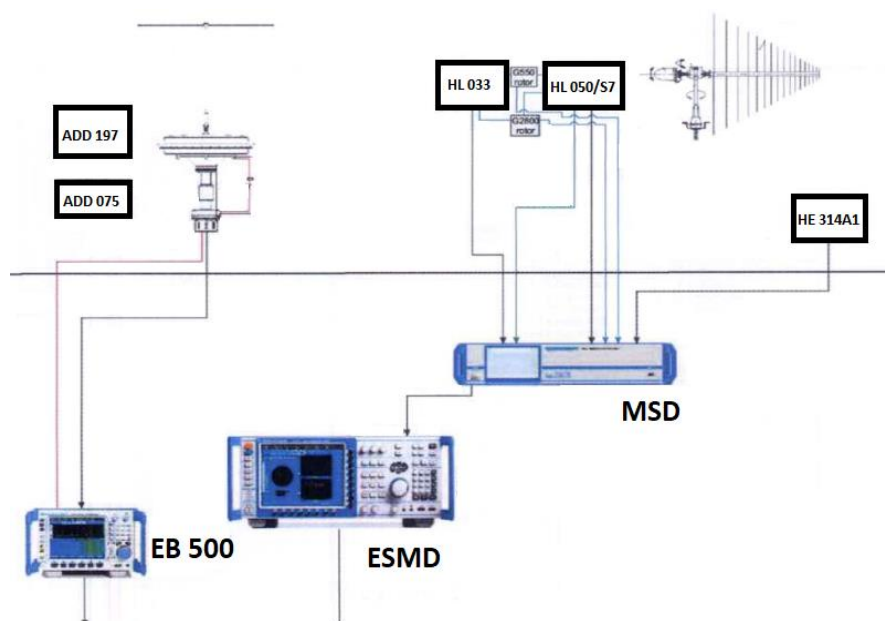


Рисунок 5 – Стационарный пункт контроля РЭО [17]

Стационарный пункт контроля радиоэлектронной обстановки содержит:

– логопериодическую антенну, работающую в диапазоне радиочастот от 25 до 3000 МГц [15];

– пеленгаторную антенну с двойной поляризацией, которая работает в диапазоне радиочастот от 20 до 1300 МГц [16];

– всенаправленную активную антенну HE314A1, которая работает в диапазоне частот от 30 до 500 МГц [18].

– широкополосный контрольный приемник ESMD разработан для радиомониторинга, обнаружения радиосигналов и мониторинга спектра радиосигналов в диапазоне частот от 8 кГц до 40 ГГц [19].

Средства контроля ЭМС РЭС в районах развёртывания стационарного и мобильных космодромных командно-измерительных комплексов должны размещаться с условием обеспечения контроля ЭМО в заданных диапазонах частот и удовлетворять следующим требованиям по назначению [17]:

– стационарные пункты контроля РЭО на территории КЦ «Восточный» должны обеспечивать контроль РЭО в диапазоне частот от 10 кГц до 40 ГГц;

– автономные пункты контроля РЭО должны обеспечивать непрерывный контроль РЭО в полосе частот РЭС от 100 МГц до 3 ГГц;

– подвижный пункт контроля РЭО на базе микроавтобуса повышенной проходимости, должен обеспечивать контроль РЭО в диапазоне радиочастот от 20 МГц до 18 ГГц [20].

1.4 Комплектация пункта контроля ЭМС стационарного поста ВКИП

Пункт контроля ЭМС стационарного поста ВКИП укомплектован следующим оборудованием.

1) Стационарная антенна AOR-DA3200 (рисунок 6) является приемной и предназначена для целей радиомониторинга, работающая в диапазоне частот от 25 до 3000 МГц с коэффициентом усиления равным 3 дБ [15].



Рисунок 6 – Стационарная антенна AOR-DA3200 [15]

2) Логопериодическая антенна HL033 предназначена для измерения напряженности поля или определения направления падения и поляризации сигнала, а также в качестве передающей в диапазоне частот от 80 до 2000 МГц с коэффициентом усиления равным 2 дБ (рисунок 7) [21].



Рисунок 7 – Логопериодическая антенна HL033 [21]

3) Всенаправленная активная антенна HE314A1 (рисунок 9) применяется для измерения напряженности ЭМП, параметров ЭМС РЭС в диапазоне частот от 30 до 500 МГц [18].



Рисунок 9 – Всенаправленная активная антенна HE314A1 [18]

4) Пеленгаторная антенна с двойной поляризацией ADD197 (рисунок 8) предназначена для использования в мобильном и стационарном варианте. Встроенный переключатель позволяет выбирать поляризацию принимаемых сигналов в диапазоне частот от 20 до 1300 МГц (для горизонтальной поляризации от 40 до 1300 МГц) [16].



Рисунок 8 – Пеленгаторная антенна с двойной поляризацией ADD197 [16]

5) Широкополосный контрольный приемник ESMD (рисунок 10) разработан для задач поиска сигналов, радиомониторинга, обнаружения радиосигналов и мониторинга спектра радиосигналов в диапазоне частот от 8 кГц до 40 ГГц.



Рисунок 10 – Широкополосный контрольный приемник ESMD [19]

Широкополосный контрольный приемник выполняет совместимые с международным союзом электросвязи (МСЭ) измерения и отвечает требованиям органов безопасности и организаций [19].

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Восточный командно-измерительный пункт КЦ «Восточный»

Объектом исследования являются характеристики электрического поля радиосигнала, излучаемого базовой станцией (находящейся на Техническом комплексе КЦ «Восточный») и воздействующего на технические средства и измерительную аппаратуру, входящую в состав ВКИП.

Восточный командно-измерительный пункт (ВКИП) входит в комплекс средств измерений, сбора и обработки информации космодрома «Восточный» и включает в себя унифицированный технологический модуль, комплекс антенных систем для приема и передачи телеметрической информации, мобильные измерительные пункты сухопутного и морского базирования, аппаратно-программные комплексы и другие комплексы и системы [22].



Рисунок 11 – Восточный командно-измерительный пункт [22]

Основные группировки РЭС ВКИП представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень группировок РЭС ВКИП [17]

п/к п	Наименование РЭС	Кол-во РЭС	Примечание
1	МРТК	6	Многофункциональный ретранслятор команд телеметрии
2	КИС «Клён»	1	Земная станция ЕКТС «Клён»

3	КИС «Клён-СП»	1	Наземная станция системы аварийного спасения
		1	Наземная станция системы аварийного спасения
4	КИС «Клён-Р»	1	Контрольная земная станция многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) "ЛУЧ"*
		1	Контрольная земная станция многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) "ЛУЧ"
		1	Земная станция ретрансляции многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) "ЛУЧ"
5	ЗС КИС-Л	1	Земная станция контрольно-измерительной системы МКСР «Луч»
6	КИС «Компарус-У2»	1	Земная станция КИС «Компарус»
7	РТМК «Вектор-В»	1	Земная станция системы видеоконтроля
8	ЦЗССС	1	Земная станция спутниковой связи
		1	Земная станция спутниковой связи

Земная станция (ЗС) – станция, располагающаяся на поверхности Земли, или в основной части атмосферы, осуществляющая связь с космическими станциями при помощи отражающих спутников или других космических объектов [2].

Базовая станция, находящаяся на Техническом комплексе, является компонентом системы радиосети, отвечающей за организацию радиосвязи между абонентскими радиостанциями, расположенными в зоне обслуживания, и оборудованием сети ТЕТРА. Таким образом, базовую станцию, необходимо рассматривать как возможный источник помех для РЭС находящихся на других объектах космодрома и попадающих в зону покрытия этой станции.

Базовая станция (БС) – компонент системы радиосети, отвечающий за организацию радиосвязи между абонентскими радиостанциями (АС), которые расположены в зоне обслуживания в радиусе 50 км, и оборудованием сети ТЕТРА. Функциональные возможности станции позволяют организовать передачу данных с различными скоростями в зависимости от количества используемых каналов, качества связи. Абонентская станция – подвижное РЭС предназначением, которого является прием и (или) передача информации по радиоканалу [23].

Три условия распространения дециметровых волн базовой станции (БС) сотовой системы с подвижной абонентской станцией (АС) [2]:

- связь между БС и АС, когда антенны подняты над строением (потери при передаче сигнала объясняются неровностями рельефа);
- связь между БС и АС, когда антенна БС поднята над строением, а антенна АС находится ниже уровня верхних этажей;
- связь между БС и АС с расположением антенн внутри строения [2].

Базовая станция стандарта TETRA осуществляет как прямую радиосвязь между АС, а также транкинговую радиосвязь. В стандарте TETRA используется диапазон частоты от 150 до 900 МГц [3].

Стандарт предоставляет пользователям широкий спектр функций и услуг, в частности:

- передачу данных/пакетную передачу данных;
- дистанционное прослушивание окружающей обстановки;
- автоматический поиск и идентификацию абонентов;
- блокировку абонентских радиостанций при попытке несанкционированного доступа в сеть;
- режим работы мобильной радиостанции в качестве ретранслятора (шлюза) для расширения зоны радиопокрытия портативных радиостанций [24].

2.2 Методы исследования

Решение поставленных задач: построение профиля рельефа местности, расчет напряженности электрического поля радиоволн на заданной трассе по разным моделям распространения радиоволн и регистрация спектров принимаемых сигналов осуществляется с помощью с помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус». Расчет ослабления напряженности электрического поля радиоволн на заданной трассе осуществлялся с использованием основных формул рассматриваемых моделей распространения радиоволн.

Программно-методический комплекс «Эфир» основывается на следующих методиках.

- 1) Методика расчета множителя ослабления на трассах распространения

радиоволн, включающая модели [13]:

а) с учетом рельефа местности и подстилающей поверхности – модель дифракции на сфере;

б) без учета рельефа местности и подстилающей поверхности – модель Окумура-Хата.

2) Методика расчета уровня напряженности поля для обеспечения приема сигнала с заданным качеством (разработана на основании рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ) и описаний стандартов связи IEEE).

В качестве исходной информации при проведении расчетов используются:

– характеристики РЭС, получаемые из учетной базы данных ПМК «Эфир»;

– параметры расчета (пороговые значения, шаг расчета, модель расчета и др.), определяемые на основе рекомендаций и методик и уточняемые оператором;

– картографические данные (рельеф местности, тип подстилающей поверхности, информация о застройке и др.), получаемые из цифровых карт местности.

На каждом посту контроля РЭО установлено программное обеспечение (ПО) «Аргус» с помощью которого выполняются все манипуляции по измерениям, как широким диапазоне частот, так и по выбранному короткому интервалу и предоставляет возможность записи результатов измерений.

ПО «Аргус» позволяет осуществлять радиоконтроль и мониторинг и получать результат согласно рекомендациям Международного Союза Электросвязи (МСЭ), а также накапливать статистические данные и анализировать полученную информацию за определенный промежуток времени.

В качестве вводимых параметров ПО «Аргус» содержит:

– набор антенн определенного рабочего диапазона частот, подключенный к приемнику;

– максимальный уровень напряженности радиосигнала.

Расчет напряженности электрического поля радиосигнала по модели «Свободного пространства» проводится по следующей формуле [10, 11]:

$$E_{\text{СВ}} = 76,6 + P_{\text{ЭИМ}} + D - 20 \log d, \quad (1)$$

где $E_{\text{СВ}}$ – определяемая напряженность поля, дБ·мкВ/м;

$P_{\text{ЭИМ}}$ – эффективная излучаемая мощность передатчика, дБ·Вт;

D – коэффициент усиления антенны, дБ;

d – расстояние между концами трассы, км.

Эффективная излучаемая мощность передатчика определяется по формуле:

$$P_{\text{ЭИМ}} = P \cdot D, \quad (2)$$

где P – излучаемая мощность передатчика, Вт.

Ослабление напряженности поля радиосигнала в модели «свободного пространства» определяется по формуле [2]:

$$L_{\text{СВ}} = \alpha + 20 \log d, \quad (3)$$

где $L_{\text{СВ}}$ – потери передачи на трассе распространения протяженностью d км от радиопередатчика к радиоприемнику, дБ;

α – коэффициент, зависящий от частоты и высоты расположения антенн, определяемый по формуле:

$$\alpha = 32,5 + 20 \log f. \quad (4)$$

Модель Окумура-Хата, описывающая распространение радиоволн от передающей БС над квазиплоской местностью без учета рельефа местности позволяет рассчитать напряженность поля и его ослабление. Эта модель рекомендована для определения напряженности поля и его ослабления в диапазоне частот передатчика от 100 до 1500 МГц, расстояниях между БС и АС от 1 до 20 км, при высотах БС от 30 до 200 м и высоте АС от 1 до 10 м [25].

Напряженность поля радиосигнала определяется как [2]:

$$E_{OX} = 39,82 + P_{\text{эим}} - 6,16 \log f + 13,82 \log h_{\text{БС}} + a(h_{\text{АС}}) - (44,9 - 6,55 \log h_{\text{БС}}) \cdot (\log d)^b, \quad (5)$$

где E_{OX} – определяемая напряженность поля, дБ·мкВ/м;

$P_{\text{эим}}$ – эффективная излучаемая мощность передатчика, дБ·Вт;

f – частота излучения передатчика, МГц;

$h_{\text{БС}}$ – эффективная высота антенны базовой станции над уровнем земли в диапазоне от 30 до 200 м;

$h_{\text{АС}}$ – высота антенны подвижной станции над уровнем земли в диапазоне от 1 до 10 м;

$a(h_{\text{АС}})$ – поправочный коэффициент на высоту приемной антенны;

d – расстояние между концами трассы, км;

b – коэффициент, расширяющий действие модели для протяженности трассы при $d \leq 20$ км, равный единице [2].

Поправочный коэффициент на высоту приемной антенны определяется по формуле:

$$a(h_{\text{АС}}) = (1,1 \log f - 0,7)h_{\text{АС}} = 1,56 \log f - 0,8. \quad (6)$$

Ослабление напряженности поля по модели Окумура-Хата определяемое для квазиплоской поверхности:

$$L_{OX} = -(69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_{\text{БС}}) \log d + a(h_{\text{АС}}) - K_0, \quad (7)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий характер местности.

Для открытой местности данный коэффициент определяется как:

$$K_0 = 4,78 (\log f)^2 - 18,33 \log f + 40,94. \quad (8)$$

Напряженность поля радиосигнала и его ослабление по модели ITU-1546 определяются по ниже приведенным формулам [6, 26, 27]:

$$E_{ITU} = E_{CB} + E_2 = E_{CB} + 16,9 - 10 \log (f(h_{BC} - h_{AC})), \quad (9)$$

$$L_{ITU} = 139 - E_{ITU} + 20 \log f, \quad (10)$$

где E_{CB} – напряженность при распространении в свободном пространстве;

E_2 – медианная напряженность.

Предполагая, что земная атмосфера однородная непоглощающая среда с параметрами свободного пространства, дифракционная модель позволяет определить напряженность электрического поля волны как сумму полей прямой и отраженной от земной поверхности волн (результат интерференции прямой и отраженной радиоволн). Если между передатчиком и приемником установлена прямая видимость, то при этом необходимо учитывать, что может меняться геометрический характер профиля местности. Радиотрасса считается малопротяженной при условии, что $d < 0,2r_0$, то есть сферичность Земли мало влияет на результирующее электромагнитное поле в точке приема. В этой формуле r_0 – это дальность прямой видимости, определяемая по формуле [28]:

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_{BC}} + \sqrt{h_{AC}}). \quad (11)$$

Результирующее поле в точке наблюдения:

$$E = E_{пр} + \sum_i R_{отр i} \cdot E_{пад i}, \quad (12)$$

где $E_{пр}$ – напряженность поля прямой видимости, которую можно рассчитать как поле излучателя, используя модель «Свободного пространства»;

$R_{отр i}$ – коэффициент отражения плоской волны от границы раздела двух сред, зависящий от длины волны излучения и электрических параметров поверхнос-

ти (относительно диэлектрической проницаемости участков трассы);

$E_{\text{пад}}$ – напряженность поля падающей волны [28].

Приближенно можно рассматривать водные участки трассы как диэлектрик, участки трассы без подстилающей поверхности как проводник, полупроводник или диэлектрик, а участки трассы, покрытые растительностью – полупроводник [28].

Напряженность поля радиосигнала падающей волны определяется по формуле:

$$E_{\text{пад}} = 132,3 - P_{\text{эим}} + 40 \log d - 20 \log h_{\text{БС}} - 10 \log h_{\text{АС}} - D. \quad (13)$$

Коэффициент отражения в зависимости от типа трассы могут быть определены по экспериментальным графикам зависимости, представленным в работе [28].

На величину потерь напряженности электрического поля радиоволн, распространяющихся над неровной поверхностью, влияют:

- величина просвета между прямым лучом и неровностями поверхности или величина блокирования прямого луча препятствием;
- положение выступающих частей или препятствий на трассе распространения;
- степень остроты выступающих частей или препятствий [28].

Для оценки влияния первых двух из перечисленных факторов используется отношение просвета F к радиусу первой зоны Френеля F_1 [28].

Просвет определяется по формуле [28]:

$$F = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (14)$$

где λ – длина волны излучения передающей антенны, м;

d_1 и d_2 – расстояния от вершины препятствия до двух конечных точек радиолинии, м.

Радиус первой зоны Френеля определяется по формуле:

$$F_1 = 547,8 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}}. \quad (15)$$

Если отношение этих радиусов имеет значение 0,6, то дополнительные потери на дифракцию отсутствуют. На многих трассах распространения встречаются одно или несколько отдельных препятствий, и поэтому целесообразно оценить потери, вызванные отдельными препятствиями. В этом случае обычно ограничиваются оценкой потерь на дифракцию, вызванных одним или двумя препятствиями. Дифракционные потери на всей трассе могут быть определены как сумма потерь в свободном пространстве и суммой потерь каждого из препятствий [28]:

$$L_{\text{диф}} = L_{\text{св}} + \sum_i L_{\text{диф } i}, \quad (16)$$

где $L_{\text{диф } i}$ – потери, обусловленные каждым препятствием [28].

При расчете потерь идеализируется форма препятствий (клином или цилиндром) [28].

Тогда для определения дифракционных потерь на клиновидном препятствии вводится безразмерный параметр v , к которому сводятся все существенные для распространения радиосигнала геометрические характеристики профиля местности [5, 8, 28].

Ослабление напряженности поля по дифракционной модели на клиновидном препятствии определяется по формуле:

$$L_{\text{кл}} = L_{\text{пр}} + (1 - \exp(-\frac{L_{\text{пр}}}{6})) \cdot (10 + 0,2d), \quad (17)$$

где $L_{\text{пр}}$ – промежуточное затухание между некоторыми точками трассы, дБ [8, 28].

Промежуточное затухание определяется следующим образом:

$$L_{\text{пр}} = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1), \quad (18)$$

где v – безразмерный параметр, определяемый для каждой промежуточной точки профиля [5, 8, 28].

Безразмерный параметр определяется в зависимости от частоты передаваемого сигнала и расстоянием между АС и БС. Параметр может быть рассчитан по следующей формуле:

$$v = 2 \sqrt{\frac{d}{\lambda}}. \quad (19)$$

В большинстве ситуаций препятствия, встречающиеся на местности, не похожи на простой клин в этом случае препятствия моделируют цилиндром радиуса r (рисунок 12). Для этого необходимо нарисовать профиль объекта и провести прямые линии из конечных точек линии связи так, чтобы они касались самых высоких частей объекта, которые видны из индивидуальных ракурсов.

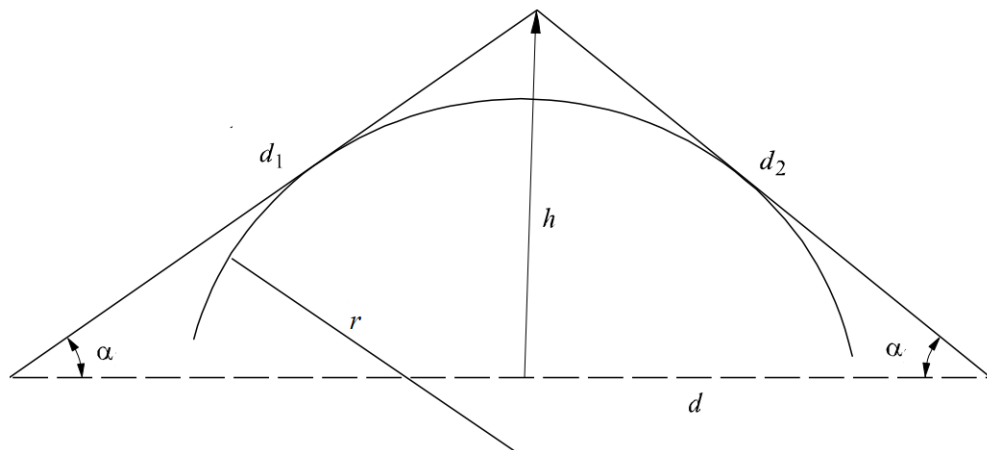


Рисунок 12 – Модель препятствия с закругленной вершиной [28]

Потери напряженности поля на препятствии цилиндрической формы:

$$L_r = 11,7\alpha \sqrt{\frac{\pi r}{\lambda}}. \quad (20)$$

Исходя из выше рассмотренных моделей, можно сделать вывод, что самой точной и сложной в расчете моделью является дифракционная, так как она учитывает рельеф местности на всем участке распространения, в отличие от других моделей.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ МЕЖДУ ГРУППИРОВКАМИ РЭС КЦ «ВОСТОЧНЫЙ»

3.1 Расчет напряженности электрического поля на заданной трассе

Для проведения анализа и расчета условий распространения радиоволн на заданной трассе между БС Технического комплекса и группировками РЭС объекта ВКИП КЦ «Восточный» в зависимости от расстояния между концами трассы при заданных параметрах передатчика и приемника радиосигнала необходимо выполнить построение профиля рельефа местности. Построение профиля проведено в программном комплексе «Эфир» с учетом наличия на заданной трассе подстилающей поверхности, водоемов и лесных массивов, а также различных застроек.

На рисунке 13 приведено полученное с помощью ПМК «Эфир» отображение профиля рельефа местности от стационарного пункта, расположенного на ВКИП до базовой станции, расположенной на Техническом комплексе.

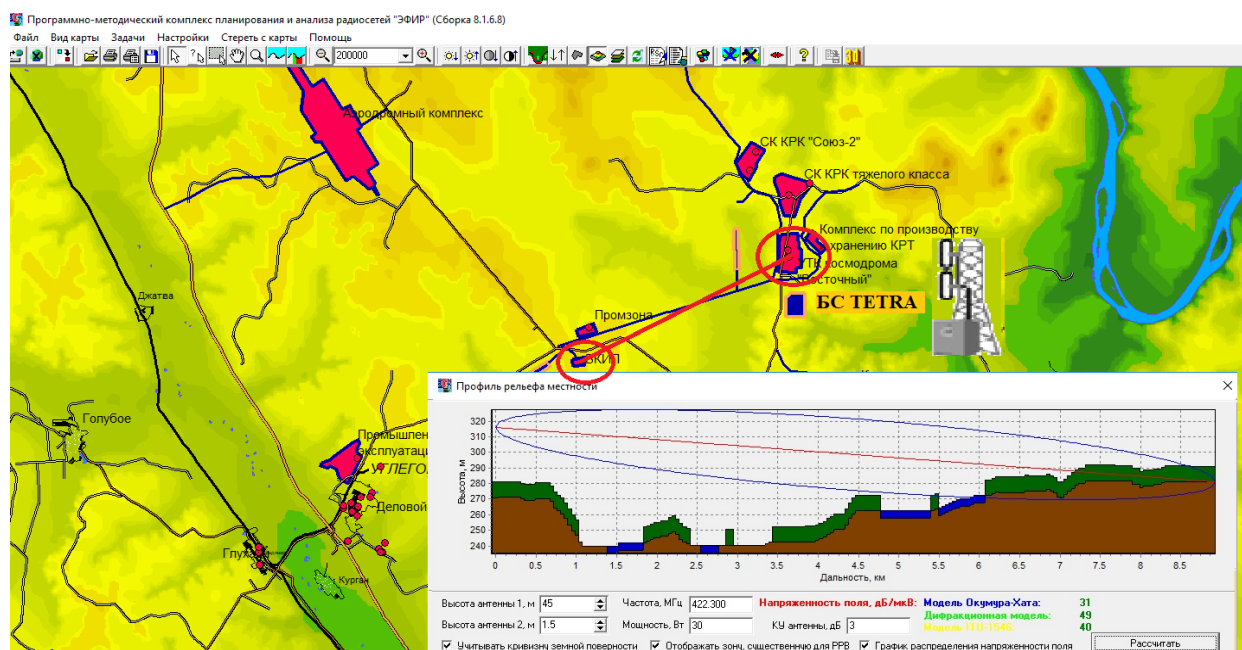


Рисунок 13 – Профиль рельефа анализируемого участка местности [13]

Цифровая карта местности представляет собой компьютерную модель местности, созданную путем цифровизации карт и обработки данных дистанционно [13].

В программном комплексе загружалась цифровая карта местности на ко-

торой осуществлялся выбор участка местности для построения профиля трассы. В качестве исходных данных использовались географические координаты РЭС и высоты установки передающей и приемной антенн. На рисунке красной линией обозначена линия визирования от передатчика к приемнику через подстилающую поверхность профиля рельефа.

Для расчета напряженности электрического поля радиосигнала в программном комплексе «Эфир» использовались исходные параметры передающей антенны (базовая станция) и принимающей антенны (стационарный пункт контроля ВКИП) (таблица 3). Расчет производится для одного значения рабочей частоты БС TETRA равной 422,3 МГц.

Таблица 3 – Параметры передающей и принимающей антенн

Наименование физической величины	Обозначение физической величины и ее единицы измерения	Значение величины
Эффективная излучаемая мощность передатчика	$P_{\text{эим}}$, Вт	30
Коэффициент усиления антенны	D , дБ	3
Эффективная высота антенны базовой станции над уровнем земли в диапазоне от 30 до 200 м	h_1 , м	45
Высота антенны подвижной станции над уровнем земли в диапазоне от 1 до 10 м	h_2 , м	1,5
Расстояние между концами трассы	d , км	9
Частота излучения передатчика	f , МГц	422,3

На рисунке 14 показано распространение радиосигнала на заданной трассе. Как видно из рисунка в пределах эллипсоида Френеля профиль заданной трассы представляет собой рельеф местности с изменяющейся высотой, наличием подстилающей поверхности и водоемов.

На рисунке также приведен график зависимости напряженности электрического поля радиоволны от расстояния, рассчитанной по наиболее распространенным моделям (Окумура-Хата, дифракционной и ITU-1546).

На графике синим цветом представлена зависимость $E = F(d)$ полученная по модели Окумура-Хата. Поскольку данная модель не учитывает особенностей

рельефа местности, то, как видно из рисунка зависимость является более сглаженной, без выраженных пиков по сравнению с зависимостями, полученными по другим моделям.

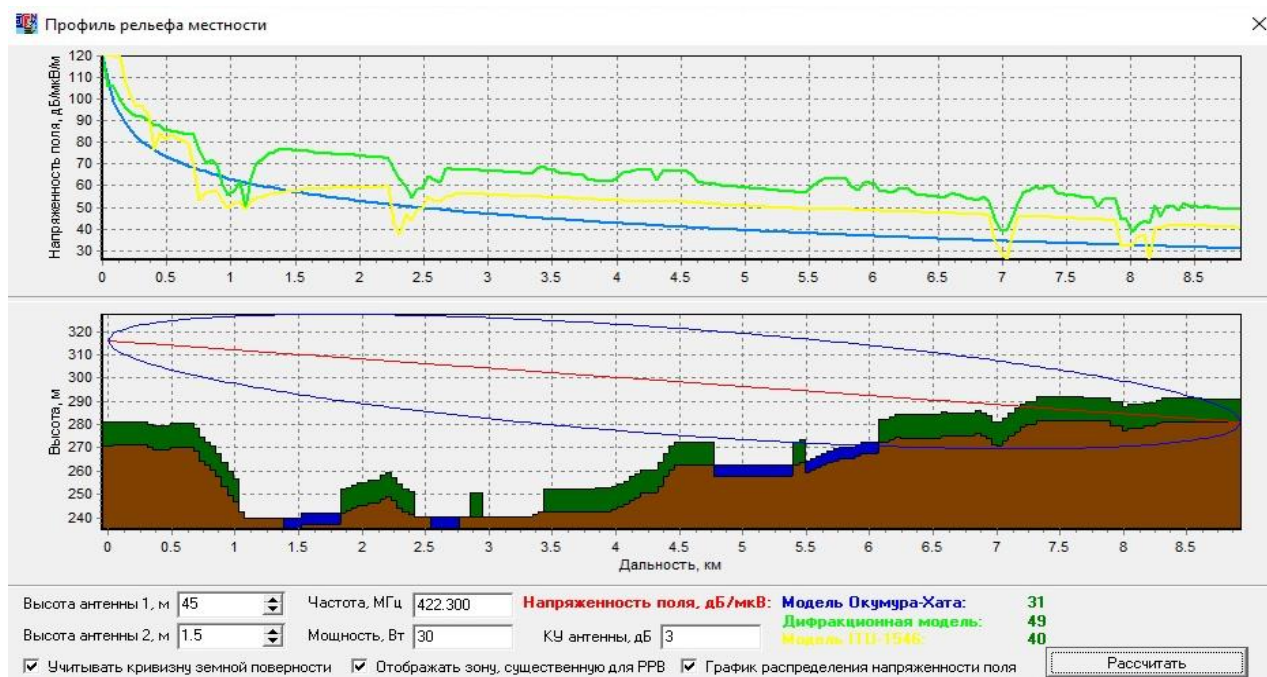


Рисунок 14 – Профиль рельефа местности и график зависимости напряженности электрического поля радиоволны от расстояния [13]

На зависимостях напряженности электрического поля радиоволн от расстояния рассчитанных по ITU-1546 и дифракционной моделям (обозначены желтым и зеленым цветом соответственно) наблюдаются выраженные пики. Присутствие пиков обусловлено наличием в профиле заданной трассы мест с различной высотой, лесоместностью и водных поверхностей.

При этом различие зависимостей по ITU-1546 и дифракционной моделям обусловлено тем, что первая модель предназначена в основном для расчета напряженности поля радиосигнала, распространяющегося только по сухопутным трассам. Дифракционная модель дает более точное распределение напряженности поля радиоволны от расстояния между базовой и абонентской станциями. Так как эта модель помимо изменения геометрии рельефа (различного вида неровности поверхности трассы) учитывает и изменение его типа. То есть в данной модели учитывается: тип почвы; наличие на трассе лесоместности;

наличие участков водной трассы, так как распространение радиоволн в надводной части отличается от распространения над сушей из-за различий в ионизации воздуха и др.

На графике зависимости также видно, что значения напряженности поля радиосигнала от БС рассчитанные по трем моделям не сильно отличаются друг от друга при расстоянии до 1 км. Так как на этом участке местности профиль трассы не сильно изменяется, т.е. условия распространения радиоволн на этом участке трассы достаточно однородные. Для дальнейших участков трассы значения напряженности поля отличаются в зависимости от местных особенностей участков трасс. В точке приема электромагнитной волны на АС результаты измерений напряженности поля по трем моделям отличаются в 1,2 – 1,6 раза.

С помощью ПО «Аргус» проведена регистрация спектров радиосигналов стационарным постом контроля восточного командно-измерительного пункта (ВКИП). Полоса частот, в которой происходил спектральный анализ, составляла от 20 до 3000 МГц.

Регистрация спектров сигналов в частотном диапазоне производилась с поочередным подключением принимающих антенн: стационарной антенной АОР-DA3200; всенаправленной активной антенной HE314A1; логопериодической антенной HL033.

В качестве исходных данных используются: тип антенны и ее частотный диапазон; тип оборудования для мониторинга и пеленгации; максимальный уровень напряженности радиосигналам РЭС всех объектов.

На рисунках 15 – 17 представлены спектры принимаемого сигнала стационарным пунктом контроля на объекте ВКИП от других РЭС в частотном диапазоне от 20 до 500 МГц. Указателем на спектрах выделена частота и уровень сигнала (значение напряженности электрического поля) от БС, расположенной на Техническом комплексе.

На спектрах зеленым цветом обозначено текущее значение уровня принимаемого сигнала, а красным цветом максимально-допустимое значение уровня этого сигнала.

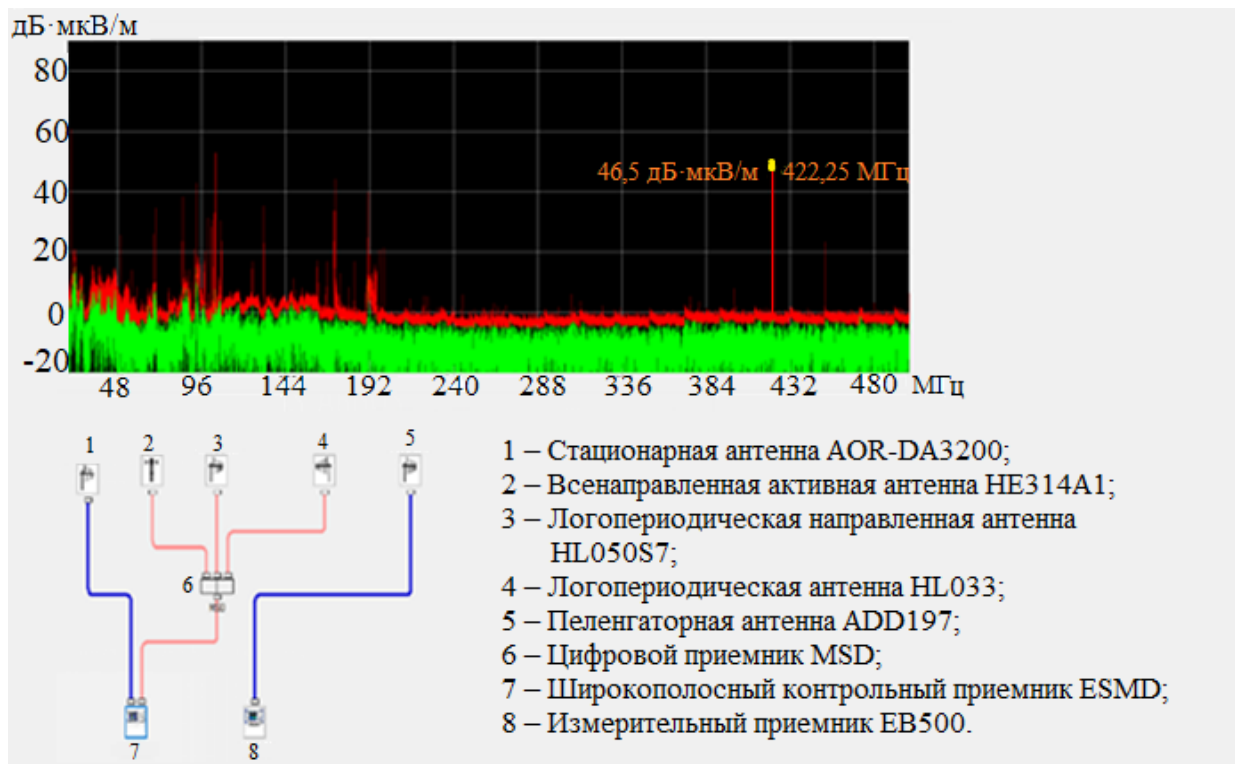


Рисунок 15 – Спектр принимаемых сигналов при подключении к антенне AOR-DA3200 [29]

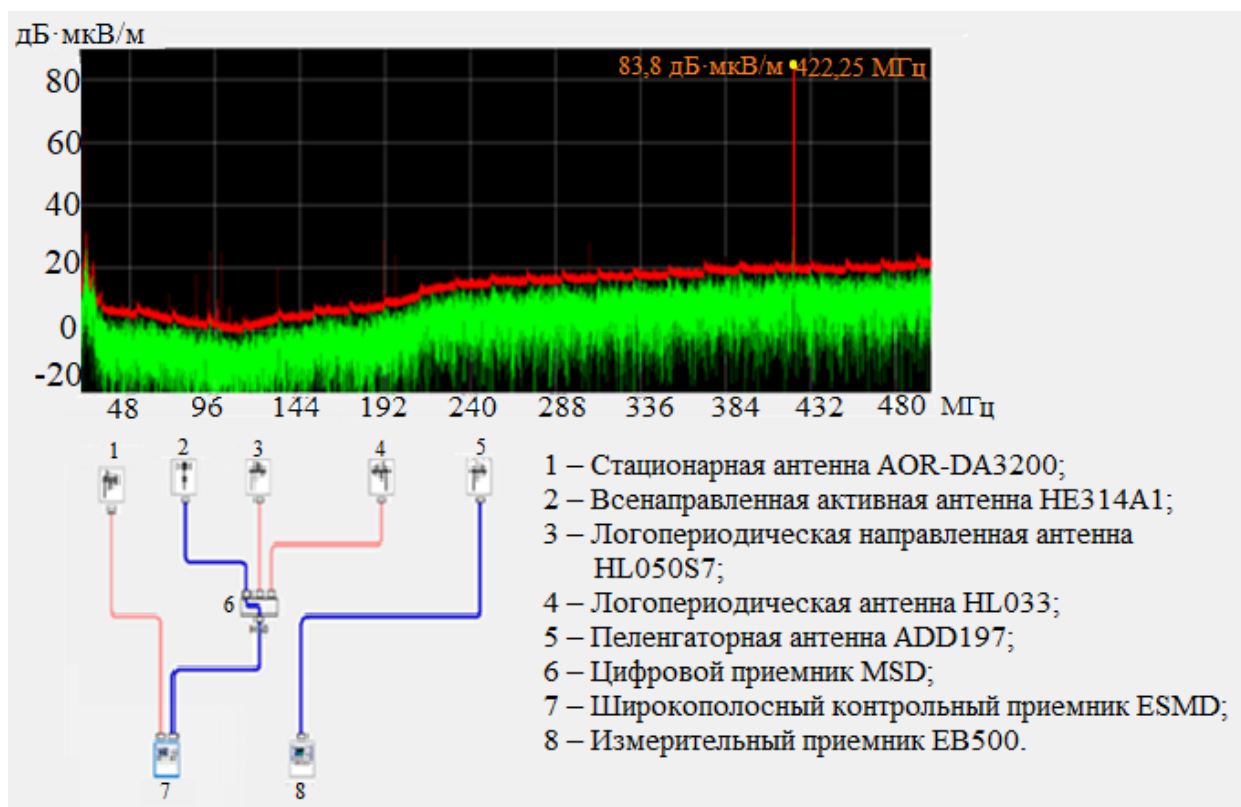


Рисунок 16 – Спектр принимаемых сигналов при подключении к антенне HE314A1 [29]

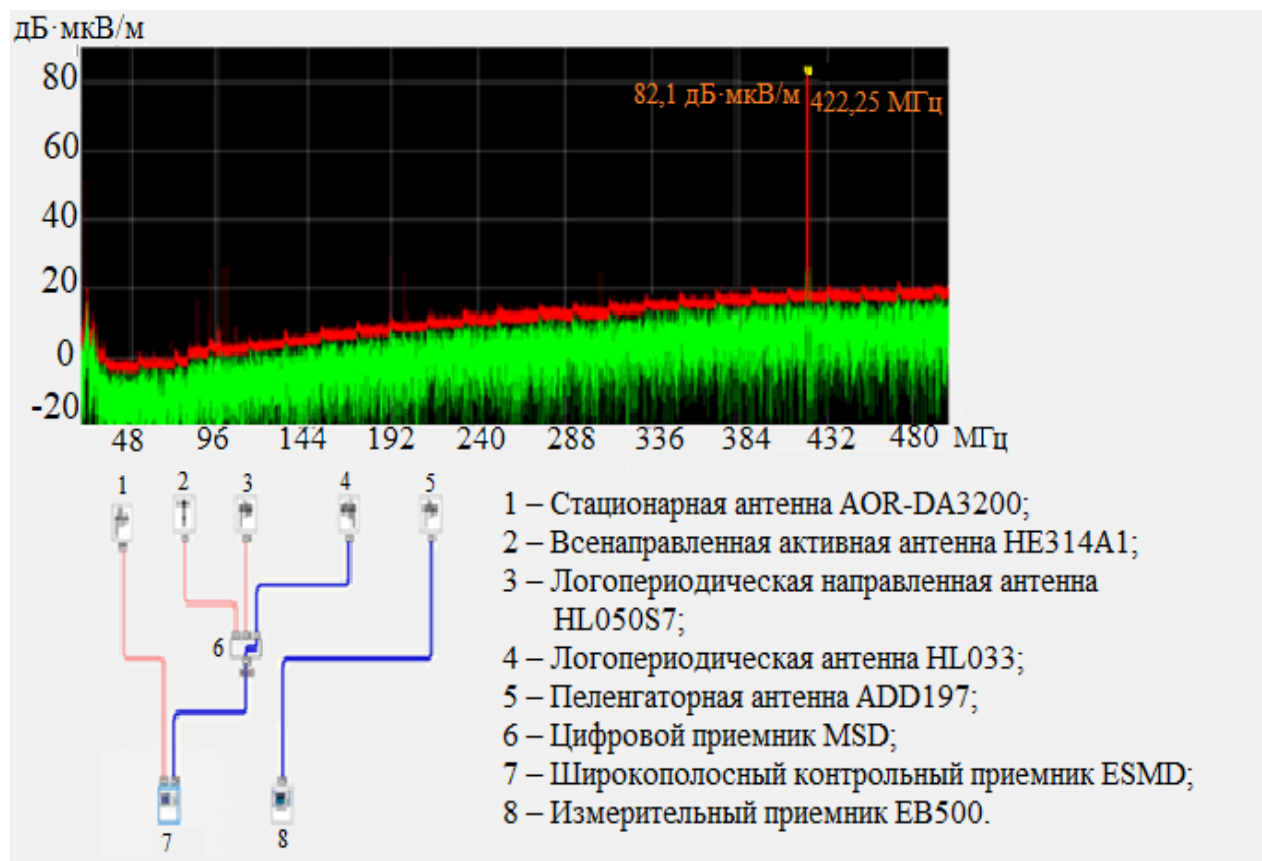


Рисунок 17 – Спектр принимаемых сигналов при подключении к антенне HL033 [29]

Из полученных спектров видно, что во всем исследуемом частотном диапазоне, уровень сигнала от базовой станции на частоте 422,25 МГц составил 46,5 дБ·мкВ/м при измерении антенной AOR-DA 3200, а при измерении антеннами HE314A1 и HL033 составил 83,8 дБ·мкВ/м и 82,1 дБ·мкВ/м соответственно. Измеренные значения сигнала от БС согласуются со значениями, полученными на постах контроля других объектов КЦ «Восточный». Значение сигнала, измеренное антенной AOR-DA 3200, незначительно отличается от значения, определенного с помощью ПМК «Эфир».

Расчет напряженности электрического поля радиосигнала БС в точке приема проведен только по дифракционной модели. При расчете считалось, что земная атмосфера однородная непоглощающая среда с параметрами свободного пространства, не учитывалось явление рефракции. Напряженность поля волны рассчитывали с использованием формул (11) – (13) как сумму полей прямой и

отраженной от земной поверхности волн для малопротяженной радиотрассы, с учетом коэффициентов отражения различных участков трасс (участки трассы без подстилающей поверхности, участки трассы, покрытые растительностью, водные участки). Результат расчета представлен в таблице 4.

Проведено сравнение результатов значений напряженности поля в точке приема (место расположения АС), полученных с помощью ПМК «Эфир», ПО «Аргус» и расчета по формулам дифракционной модели (таблица 4).

Таблица 4 – Значения напряженности электрического поля в точке приема

Значение напряженности поля, рассчитанное по дифракционной модели дБ·мкВ/м	Значение напряженности поля, определенное с помощью ПМК «Эфир», дБ·мкВ/м	Значение напряженности поля, определенное с помощью ПО «Аргус», дБ·мкВ/м
41,7	49	46,5

3.2 Расчет ослабления напряженности электрического поля по разным моделям распространения радиоволн

Ослабление напряженности электрического поля на заданной трассе проводился по моделям распространения радиоволн, описанным в п. 2.2 с использованием формул (1) – (20).

В качестве исходных данных для расчета ослабления использовались параметры передающей антенны (БС) и принимающей антенны (АС), представленные в таблице 3.

Результаты ослабления напряженности электрического поля, рассчитанные по модели «Свободного пространства» используются как базовый элемент в последующих рассматриваемых моделях. Расчет ослабления по модели Окумура-Хата проводился без учета рельефа местности, но с учетом поправочного коэффициента для открытой местности.

Поскольку рассматриваемая трасса содержит несколько отдельных препятствий, то для учета потерь, вызванных отдельными препятствиями, необходимо разделить радиотрассу на отдельные участки. Общие потери напряженности поля по ITU-1546 и дифракционной моделям определялись как сумма потерь в свободном пространстве и потерь от каждого из препятствий.

Для расчета ослабления поля по дифракционной модели определили отношение просвета F к радиусу первой зоны Френеля F_1 на участках рассматриваемой трассы. На участке трассы протяженностью 6 км это отношение оказалось меньше 0,6, следовательно, дополнительные потери на дифракцию на данном участке отсутствуют. На участке протяженностью от 6 до 9 км отношение $F/F_1=1,4$, то есть на этом участке необходимо учитывать дополнительные потери на дифракцию. На этом участке форму препятствий, вызывающих дополнительную дифракцию, будем рассматривать как цилиндрическую. Суммарные потери ослабления по дифракционной модели рассчитывались с использованием формул (3), (4), (16), (20) п. 2.2.

На рисунке 18 представлен график, отображающий зависимости ослабления напряженности электрического поля радиосигнала от расстояния между приемником (АС) и передатчиком сигнала (БС), рассчитанные по различным моделям распространения радиоволн.

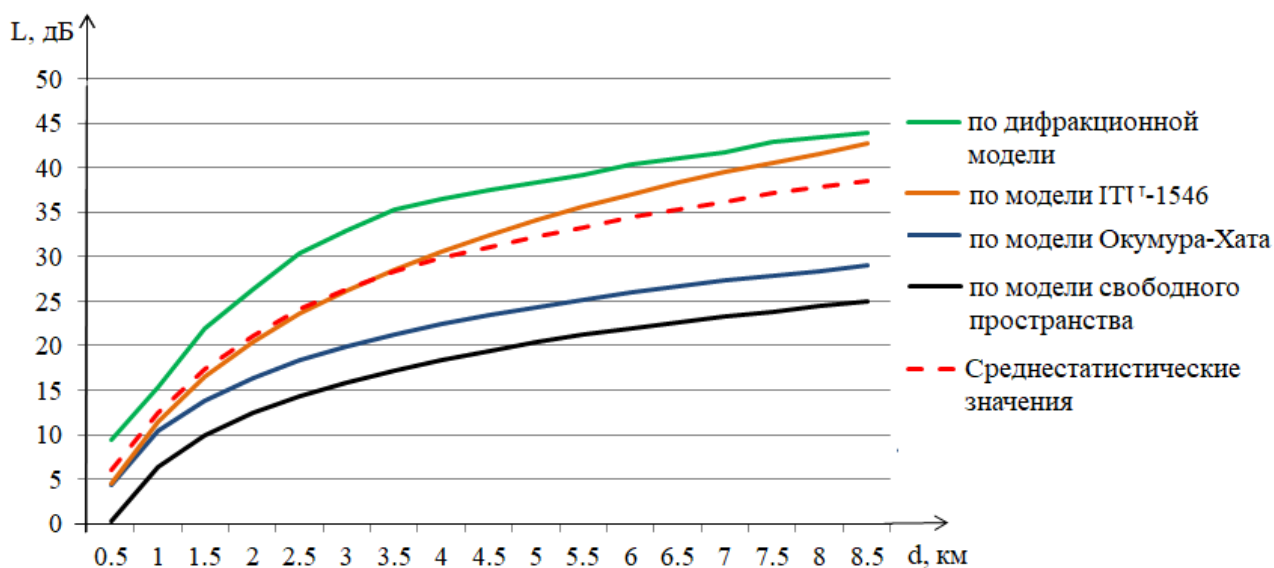


Рисунок 18 – Ослабление напряженности электрического поля на заданной трассе по разным моделям распространения радиоволн

Кривая, соответствующая условиям распространения радиоволн в свободном пространстве (базовая кривая), в точке приема радиосигнала имеет наименьшее ослабление, обусловленное расширением фронта волны.

Результаты расчетов ослабления по модели Окумура-Хата, находятся выше базовой кривой примерно на 5 дБ по всей длине рассматриваемой трассы. Что соответствует условиям распространения сигнала открытой местности, приближающимся к условиям свободного пространства.

Кривые, соответствующие расчётам ослабления поля по дифракционной и ITU-1546 моделям, расположены выше кривых, соответствующих базовой и модели Окумура-Хата. Наибольшее ослабление напряженности поля по этим двум моделям обусловлено сложным условиям распространения радиоволн, а именно, постоянным изменением рельефа местности по трассе, наличием водоемов и лесоместности.

Наибольшие значения ослабления напряженности электрического поля радиосигнала в точке приема получены по дифракционной и ITU-1546 моделям и составляют 43 дБ и 44 дБ соответственно. Это обусловлено тем, что при расчете ослабления по этим двум моделям учитываются изменение рельефа местности по трассе, наличием водоемов и лесоместности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

КЦ «Восточный» состоит из нескольких объектов, содержащих в своем составе группировки РЭС различного вида и пункты контроля электромагнитной совместимости, направленные на контроль электромагнитной обстановки на объектах космодрома во избежание возникновения электромагнитных помех.

Распределение характеристик электрического поля радиоволн базовой станции TETRA от расстояния получено по разным моделям распространения радиоволн и с помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус». На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Определено значение напряженности электрического поля радиосигнала от базовой станции TETRA в точке приема на объекте ВКИП КЦ «Восточный» по дифракционной модели, равное 41,7 дБ·мкВ/м. Полученное значение напряженности поля не значительно отличается, от значений определенных с помощью программных комплексов «Эфир» и «Аргус».

2) Показано, что наибольшие значения ослабления напряженности электрического поля радиосигнала в точке приема, полученные по дифракционной и ITU-1546 моделям и составляют 44 дБ и 43 дБ соответственно. Это обусловлено тем, что при расчете ослабления по этим двум моделям учитываются изменение рельефа местности по трассе, наличием водоемов и лесоместности.

Установлено, что напряженность электрического поля радиосигнала от БС TETRA в точке приема на объекте ВКИП не превышает предельно допустимого значения 50 дБ·мкВ/м. Таким образом, электромагнитное поле, создаваемое базовой станцией не будет вносить помехи в работу РЭС находящихся на объекте ВКИП, попадающего в зону покрытия этой станции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Обеспечение электромагнитной совместимости: курс лекций (корпоративный портал ТПУ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/u/ULTRATONE/uchebnaya_rabota/Tab/Lecture.pdf (дата обращения: 22.02.2019).

2 Ефанов, В. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.И. Ефанов, А.А. Тихомиров ; ТУСУР – Томск, 2012. – 228 с. Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/748/download> (дата обращения: 29.03.2019).

3 Основы радиосвязи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://viol.uz/radiovolnyi-i-chastoty.html> (дата обращения: 20.02.2019).

4 Синкин, Е. Е. Оптимизация параметров сети наземного телевизионного вещания [Электронный ресурс] : дисс. магистра : 11.04.02 / Е.Е. Синкин, СибГУТИ. – Новосибирск, 2017. – 63 с. Режим доступа: <https://sibsutis.ru/upload/cb1/ВКР%20Синкин.pdf> (дата обращения: 29.03.2019).

5 Вождаев, Д. В. Межсистемная электромагнитная совместимость [Электронный ресурс] : метод. указания / Д.В. Вождаев, В.И. Ефанов, ФГБОУ ВПО ТУСУР. Томск, 2014. – 50 с. Режим доступа: <https://sibsutis.ru/upload/cb1/ВКР%20Синкин.pdf> (дата обращения: 29.03.2019).

6 Кульбикаян, Х. Ш. Современные технологии беспроводных телекоммуникационных систем и сетей [Электронный ресурс]: учеб.–метод. пособие / Х.Ш. Кульбикаян, Б.Х. Кульбикаян, А.В. Шандыбин , РГУПС – Ростов-на-Дону, 2017. – 149с. Режим доступа: <https://docplayer.ru/89989260-Sovremennyye-tehnologii-besprovodnyh-telekommunikacionnyh-sistem-i-setey-uchebno-metodicheskoe-posobie-dlya-laboratornyh-rabot.html> (дата обращения: 15.02.2019).

7 Бабин, А. И. Математическое моделирование радиотрасс при проектировании транкинговых систем [Электронный ресурс] / А.И. Бабин // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 12-2. – С. 276-278; Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=4170> (дата обращения: 15.03.2019).

8 Роенков, Д. Н. Применение различных моделей распространения радиоволн на дифракционных трассах для сетей поездной радиосвязи [Электронный ресурс] / Д.Н. Роенков, Г.О. Коренной // УДК 621.396.9. – 2012. – С. 138 – 145. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-razlichnyh-modeley-rasprostraneniya-radiovoln-na-difraktsionnyh-trassah-dlya-rascheta-setey-poezdnoy-radiosvyazi> (дата обращения: 15.03.2019).

9 Малодушев, С. В. Моделирование процесса эвакуации в зданиях с учетом количества и местоположения посетителей, определяемых с помощью мобильных устройств [Электронный ресурс]: дис. канд. техн. наук: 05.13.18 / С.В. Малодушев; ПГУ. – Петрозаводск, 2018. – 149 с. Режим доступа: <https://petrsu.ru/files/user/6e07d22be1742f09c8daf1b643f7d52b/Диссертация%20%28Малодушев%29.pdf> (дата обращения: 15.03.2019).

10 Горобец, Н. Н. Особенности расчета энергетических характеристик каналов подвижной радиосвязи [Электронный ресурс] / Н.Н. Горобец, А.А. Елизаренко // Радиотехника. – 2012. – № 188. –С. 138 – 145. Режим доступа: https://nure.ua/wp-content/uploads/2017/Scientific_editions/188/17.pdf (дата обращения: 18.03.2019).

11 Песков, С. Н. Расчет напряженности поля, создаваемой передатчиком [Электронный ресурс] / С.Н. Песков // Телеспутник. – 2008. – № 5. – С. 1 – 7. Режим доступа: http://www.pitri-tv.ru/pdf/Naprazonnosti_polia1.pdf (дата обращения: 19.03.2019).

12 Абдрахимова, Э. Ф. Анализ физических процессов при отражении радиоволн от поверхности земли, элементов городской застройки [Электронный ресурс] / Э.Ф. Абдрахимова, И.Н. Абрамкин // Материалы Всероссийской научно–технической конференции. – 2016. – С. 31 – 33. Режим доступа: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Aktualnye-problemy-radioelektroniki-i-telekommunikacii/Analiz-fizicheskikh-processov-pri-otrazhenii-radiovoln-ot-poverhnosti-zemli-elementov-gorodskoi-zastroiki-60061/1/31-33.pdf> (дата обращения 15.02.2019).

13 Программно-методический комплекс планирования и анализа радиосетей «Эфир» / Научно-производственная фирма «Радиян-М».

14 ЦЭНКИ Космодрома России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.russian.space/138/> (дата обращения: 16.02.2019).

15 Описание состава и принципа работы антенны AOR DA 3200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alpha-com.ru/product/aor-da3200/> (дата обращения: 29.02.2019).

16 Описание состава и принципа работы антенны R&S®ADD197 Dual Polarized DF Antenna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rohdeschwarz.com/product/add197-productstartpage_63493-10202.html (дата обращения: 29.02.2019).

17 Средства контроля ЭМС космодрома «Восточный»: пояснительная записка на средства контроля ЭМС. ФГУП «ЦЭНКИ».

18 Описание состава и принципа работы антенны R&S®HE314A1 Antenna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rohdeschwarz.com/ru/product/he314a1-productstartpage_63493-9369.html (дата обращения: 29.02.2019).

19 Описание состава и принципа работы приемника R&S®ESMD Wideband Monitoring Receiver [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/esmd-productstartpage_63493-9558.html (дата обращения: 29.02.2019).

20 Описание состава и принципа работы приемника R&S®UMS200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mir-technics.ru/products/rohdeampschwarz-ums-200-neobluzhivaemaya-stantsiya-radiomonitoringa-i-pelengovaniya-3635> (дата обращения: 28.02.2019).

21 Описание состава и принципа работы антенны R&S®HL033 Antenna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rohdeschwarz.com/ru/product/hl033-productstartpage_63493-9054.html (дата обращения: 28.02.2019).

22 Российские космические системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru/2016/03/30/novyy-komandno-izmeritelnyy-punkt/> (дата обращения: 20.02.2019).

23 Базовая станция БС-430 (стандарт TETRA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kalugapribor.ru/produce/tetra.html> (дата обращения: 25.02.2019).

24 Стандарт TETRA – основные характеристики систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radioscanner.ru/info/article124/> (дата обращения: 20.02.2019).

25 Попов, А. С. Применение методов Окамура-Хата и Введенского для расчета зон покрытия цифровых телевизионных передатчиков [Электронный ресурс] / А.С. Попов // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2. – С. 176 – 179. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-metodov-okamura-hata-i-vvedenskogo-dlya-rascheta-zon-pokrytiya-tsifrovyyh-televizionnyh-peredatchikov> (дата обращения: 20.01.2019).

26 Утц, В. А. Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи на основе статистических моделей [Электронный ресурс] / В.А. Утц // Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта. – 2011. – №5. – С. 44 – 49. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-poter-pri-rasprostranении-radiosignala-sotovoу-svyazi-na-osnove-statisticheskikh-modeley> (дата обращения: 20.01.2019).

27 Пищин, О. Н. Анализ и экспериментальные исследования затухания радиосигнала систем сотовой подвижной радиосвязи над водной гладью [Электронный ресурс] / О.Н. Пищин // Известия ЮФУ. – 2009. – № 1. – С. 43 – 49. Режим доступа: <https://docplayer.ru/113831036-O-n-pishchin-analiz-i-eksperimentalnye-issledovani-ya-zatuhaniya-radiosignala-sistem-sotovoу-podvizhnoy-radiosvyazi-nad-vodnoy-gla-dyu.html> (дата обращения: 18.03.2019).

28 Фомин, А. Н. Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн [Электронный ресурс]: учебник / А.Н. Фомин, В.А. Копылов, А.А. Филонов, А.В. Андронов; под общ. ред. А.Н. Фомина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 318 с. Режим доступа: <https://rucont.ru/file.ashx?guid=f59706d5-9596-4593-9ef5-cff7b76de85b> (дата обращения: 18.03.2019).

29 Программное обеспечение «Аргус» / ARGUS Support, Germany.