

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Факультет Радиотехнологий связи

Кафедра Радиосвязи и вещания

Направление 11.03.02 Информационные технологии и системы связи

(код и наименование)

Утверждаю:

Зав. кафедрой Воробьёв О.В.

(Ф.И.О., подпись)

«_____» _____ 2023 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы (ВКР)

1. Студент Козлов Михаил Дмитриевич № группы РМ-94
(фамилия, имя, отчество)
2. Руководитель Коротин Владимир Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры РС и В
(фамилия, имя, отчество, должность, уч. степень и звание)
3. Квалификация бакалавр
(наименование в соответствии с ФГОС ВО/ ГОС ВПО)
4. Вид работы выпускная квалификационная работа
(бакалаврская работа, дипломный проект, дипломная работа,
магистерская диссертация)

5. Тема ВКР

Многоуровневое зонирование качества покрытия сетей радиодоступа

утверждена приказом ректора университета от «12.04.2023» № 456/кс

6. Исходные данные (технические требования):

Работоспособность и исследовательский потенциал полученной модели

7. Содержание работы (анализ состояния проблемы, проведение исследований, разработка, расчеты параметров, экономическое обоснование и др.)

1. Методы измерения покрытия сети сотовой связи
2. Предлагаемая модель измерения покрытия на основе БПЛА
3. Возможности дальнейшей практической реализации проекта

8. Вид отчетных материалов, представляемых в ГЭК (пояснительная записка, перечень, графического материала, отчет о НИР, технический проект, образцы и др.): Пояснительная записка, презентация.

9. Консультанты по ВКР с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Подпись дата	
		Задание выдал	Задание принял
1.Методы измерения покрытия сети сотовой связи	Коротин В.Е	16.04.23	26.04.23
2.Предлагаемая модель измерения покрытия на основе БПЛА	Коротин В.Е	26.04.23	06.05.23
3.Возможности дальнейшей практической реализации проекта	Коротин В.Е	06.05.23	15.05.23

Дата выдачи задания «_____» _____ 20 ____ г.
 Дата представления ВКР к защите «____» _____ 20 ____ г.

Руководитель ВКР _____
 (подпись)

Студент _____
 (подпись)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

№ п/п	Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов ВКР	Примечание
1	Постановка цели выполнения ВКР и задач	16.04.23 - 05.05.23	
2	Работа с теоретическим материалом		
3	Сбор информации, необходимой для написания работы		
4	Систематизация и обработка материалов ВКР	16.04.23 - 01.06.23	
5	Анализ полученных в работе результатов, обобщение		
6	Подготовка отчетных материалов, представляемых в государственную экзаменационную комиссию, доклада к защите и презентации		
7	Консультация с руководителем ВКР		
8	Представление выполненной ВКР руководителю для подготовки отзыва		
9	Подготовка к защите ВКР, включая подготовку к процедуре защиты и процедуру защиты	01.06.23 - 07.06.23	

Студент _____

(подпись)

Руководитель ВКР _____

(подпись)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Факультет _____ Радиотехнологий связи _____

Кафедра _____ Радиосвязи и вещания _____

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

Воробьев О.В. _____

(подпись)

(Ф.И.О.)

“ _____ ” _____ Г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Многоуровневое зонирование качества покрытия сетей радиодоступа
(тема ВКР)

Вид выпускной квалификационной работы

Выпускная квалификационная работа

(бакалаврская работа, дипломная работа, дипломный проект, магистерская диссертация)

Направление/специальность подготовки

11.03.02 Информационные технологии и системы связи

(код и наименование направления/специальности)

Направленность (профиль) _____ Системы подвижной связи _____

(наименование)

Квалификация _____ бакалавр _____

(наименование квалификации в соответствии с ФГОС ВО / ГОС ВПО)

Студент:

Козлов М.Д. РМ-94

(Ф.И.О., № группы)

(подпись)

Научный руководитель:

Коротин В.Е., к.т.н., доц.

(учёная степень, учёное звание, Ф.И.О.)

(подпись)

Санкт-Петербург, 2023

Оборотная сторона титульного листа

Работа написана мною самостоятельно и не содержит неправомерных заимствований

(дата)

(подпись)

Текст ВКР размещен в электронно-библиотечной системе университета

Руководитель отдела комплектования библиотеки _____
(Ф.И.О.)

(дата)

(подпись)

Коэффициент оригинальности ВКР 85 %.

Проверил: _____
(Должность, Ф.И.О.)

(дата)

(подпись)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 46 страниц, 26 иллюстраций, 5 таблиц. **Объектом** исследования работы является рассмотрение возможности многоуровневого зонирования.

Целью работы является исследование возможности применения БПЛА в исследовании покрытия сети сотовой связи , а также внедрение решений в отрасль связи Российской Федерации.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование существующих методов измерения покрытия сетей сотовых связей , рассмотрение их недостатков , анализ существующей информации о практическом применении действующих математических и программно-аппаратных моделей
2. Теоретическая оценка преимуществ предложенного в работе метода перед существующими измерительно-аналитическими платформами, предложение по их внедрению в предложенный метод

Следуя поставленным задачам, в первой главе будут рассмотрены существующие методы измерения покрытия сетей сотовой связи.

Во второй главе данной работы будет произведено математическое моделирование предложенного решения на основе метода Лонгли-райса.

В третьей главе будут рассмотрены возможные программно-аппаратные решения для создания измерительной платформы на базе БПЛА

Практическая ценность. Рассмотрена возможность применения метода Лонгли-Райса для дальнейших исследований и практических применений на базе программно-аппаратной платформы с использованием БПЛА .

Основные выводы. В ходе написания выпускной квалифицированной работы были рассмотрены наиболее подходящие и перспективные решения для анализа и исследования покрытия сети сотовой связи .

Содержание

Введение	8
1.Методы измерения покрытия сети сотовой связи	13
1.1. Оценка существующих методов измерения сетей сотовой связи	13
1.2 Анализ внедрения БПЛА в измерения сетей сотовой связи	23
1.3 Математические модели для расчета основных потерь передачи в СПС	24
2. Предлагаемая модель измерения покрытия на основе БПЛА	36
3. Возможности создания дальнейшего исследовательского проекта ..	41
Заключение	47
Список источников.....	48
Приложение	51

Введение

Ожидается, что будущие сети радиодоступа пятого поколения (5G) будут беспрепятственно и повсеместно соединять в себе и поддерживать по меньшей мере 1000-кратный объем трафика от текущего, 100 миллиардов подключенных беспроводных устройств, что создает новые требования к надежности, задержке, сроку службы, энергоэффективности и т.д., в отличие от текущего четвертого поколения сотовой связи (4G). сети. В настоящее время популярность Интернета вещей (IoT) привела к резкому увеличению объема мобильного трафика передачи данных для будущих беспроводных сетей 5G. В соответствии с последним отчетом [1], глобальный мобильный трафик достигнет 1 зеттабайта в месяц до 2028 года.

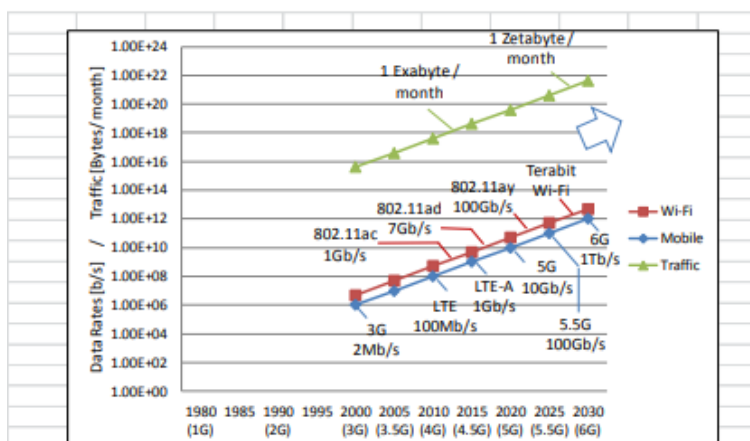


Рисунок 1. Тренд роста месячного трафика

Это приведет к тому, что существующая инфраструктура столкнется с большими требованиями к пропускной способности, а также ляжет тяжелым бременем на операторов связи с точки зрения увеличения капитальных вложений и эксплуатационных расходов. Некоторые ранние усилия были направлены на создание гетерогенных сетей (HetNets) (т.е. развертывание различных небольших ячеек) для удовлетворения этих растущих потребностей.



Рисунок 2. Структура гетерогенной сети

Однако в неожиданных или чрезвычайных ситуациях (таких как ликвидация последствий стихийных бедствий и восстановление работ служб), развертывание наземных инфраструктур экономически неосуществимо и является сложной задачей из-за высоких эксплуатационных расходов, а также сложных и изменчивых условий. Чтобы решить эту проблему, интеллектуальная гетерогенная архитектура с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (или широко известных как дроны) [3] считается многообещающей новой парадигмой для облегчения трех основных сценариев использования будущих беспроводных сетей, т.е. расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB) с использованием пропускной способности, сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC) и массовые коммуникации машинного типа (mMTC).

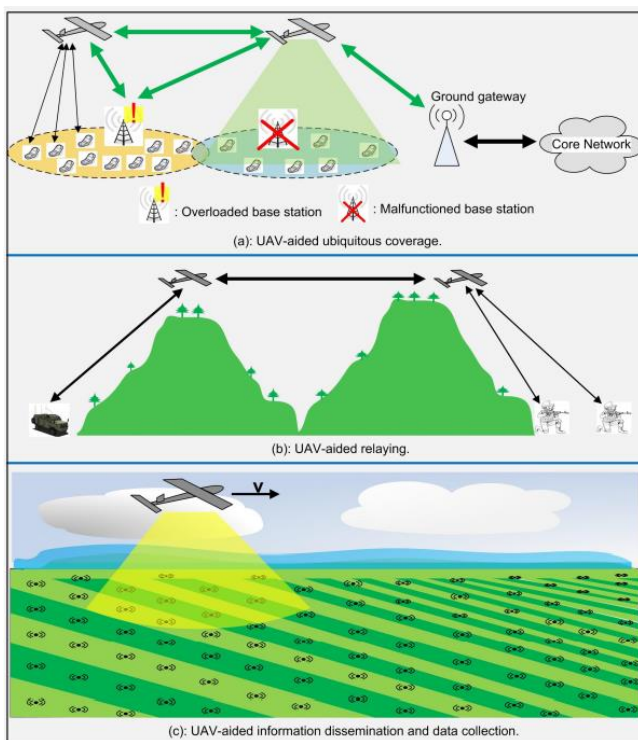


Рисунок 3. Сценарии использования БПЛА в Беспроводных сетях. а) Повсеместный охват, б) Ретрансляция, с) Распространение информации и сбор данных

Например, беспилотный летательный аппарат может играть центральную роль в обеспечении восстановления сетевых услуг в пострадавшем от стихийного бедствия регионе, укреплении сетей общественной безопасности или решении других чрезвычайных ситуаций, когда требуется URLLC (сверхнадежная межмашинная связь с низкими задержками). В частности, eMBB с поддержкой беспилотных летательных аппаратов можно рассматривать как важное дополнение к сетям сотовой связи 5G. В результате беспилотные летательные аппараты являются важным компонентом беспроводных технологий 5G.

Благодаря универсальности и высокой мобильности беспилотных летательных аппаратов, низковысотные беспилотные летательные аппараты широко используются в различных областях для различных применений и целей. С точки зрения аспектов беспроводной связи, беспилотные летательные аппараты могут использоваться в качестве платформ воздушной

связи (например, летающих базовых станций (BSS) или мобильных ретрансляторов) путем установки коммуникационных приемопередатчиков для предоставления / улучшения услуг связи наземным целям в ситуациях с высоким трафиком и перегрузкой, что обычно называют связью с помощью беспилотников. Они также могут использоваться в качестве воздушных узлов для обеспечения множества применений, начиная от доставки грузов и заканчивая наблюдением, будучи подключенными к сотовой связи

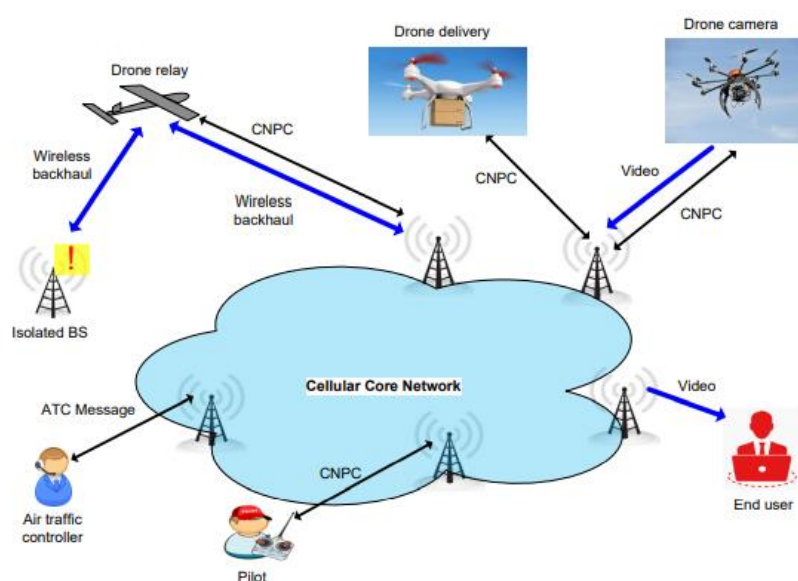


Рисунок 4. Схема применения БПЛА, подключенных к сотовой связи, для трех вариантов использования: дрон наблюдатель, дрон доставщик и дрон ретранслятор

Однако большая часть существующего объема работ ограничивается беспилотными летательными аппаратами, выполняющими роль вспомогательного средства сотовой связи. В большинстве современных ситуаций беспилотные летательные аппараты оснащены устройствами связи или специализированными датчиками, которые могут обеспечить множество применений, таких как наблюдение на малой высоте, спасение после стихийных бедствий, применение в логистике и оказание коммуникационной помощи. Кроме того, для поддержки широкополосной беспроводной связи в большой географической зоне рой беспилотных летательных аппаратов,

формирующих беспроводные самоорганизующиеся сети (FANETs) , и устанавливающие соединительные линии с наземными узлами были изучены теоретически и подтверждены в ходе полевых экспериментов.

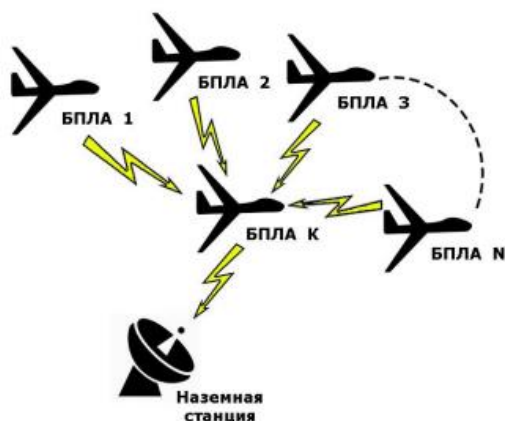


Рисунок 6. Схема организации FANETs

Являясь желательным кандидатом на замену или дополнение наземных сетей сотовой связи, связь с БПЛА обладает следующими основными характеристиками:

- **Линии прямой видимости:** Беспилотные летательные аппараты без пилотов-людей, летающие в небе, имеют более высокую вероятность подключения наземных пользователей по линиям видимости (LoS), что обеспечивает высоконадежную передачу на большие расстояния. Кроме того, беспилотные летательные аппараты могут изменять местоположение своего зависания для поддержания качества отправки.
- **Возможность динамического развертывания:** По сравнению со стационарными наземными инфраструктурами, беспилотные летательные аппараты могут быть динамически развернуты в соответствии с требованиями реального времени, что является наиболее устойчивым фактором к изменениям окружающей среды. Кроме того, беспилотные летательные аппараты в качестве воздушных BSS не требуют затрат на аренду площадки, что устраняет необходимость в развертывании вышек сотовой связи и прокладки кабельных трасс.

- Роевые сети на базе БПЛА: Рой БПЛА способен формировать масштабируемые сети с несколькими БПЛА и предлагать повсеместную связь наземным пользователям. Извлекая выгоду из своей высокой гибкости и возможности быстрого предоставления, сеть с несколькими беспилотниками является возможным решением для восстановления и расширения связи быстрыми и эффективными способами

1. Методы измерения покрытия сети сотовой связи

1.1. Оценка существующих методов измерения сетей сотовой связи

В данной работе мы не будем рассматривать методы измерения, работающие стационарно, а рассмотрим существующие подвижные методики, оценим их качество и применимость. Таким образом, в этой главе рассматриваются текущие методы оценки для характеристики покрытия в определенном местоположении, уделяя особое внимание проводимым операторами сети драйв тестам. В drive tests общий процесс включает в себя оснащение транспортного средства необходимым оборудованием для записи соответствующих измерений данных

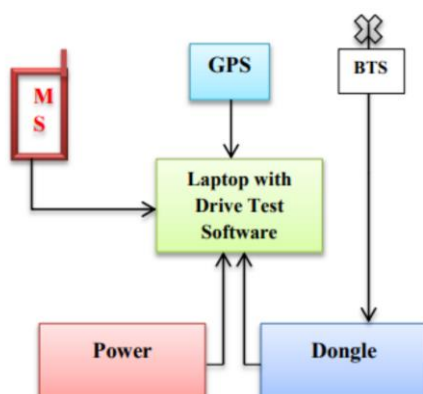


Рисунок 7. Схема подключения оборудования для драйв теста

Для работы на транспортном средстве используется источник питания (Power) , Тестовый мобильный телефон , оснащенный специальным ПО (MS), Ноутбук , с установленным измерительным ПО, GPS приемник , для записи широты и долготы каждой точки измерения вместе с потенциальной информацией о времени и скорости , а ключ служит в качестве Ключа безопасности, подключенного к ноутбуку . В процессе такого тестирования на автомобиле, оснащенном специальным измерительным оборудованием, объезжают территорию, на которой развернута сотовая сеть, и определяют ее зону радиопокрытия, емкость и показатели качества обслуживания.

План драйв-теста

Каждый маршрут движения должен быть отмечен на подробной дорожной карте с указанием точного маршрута, по которому необходимо проехать. Эти карты следует использовать во время фактической поездки для навигации испытуемого транспортного средства. Они также могут быть использованы во время проверки тестового привода, чтобы проверить правильность информации о местоположении в файле теста привода. Для каждого маршрута должна быть подготовлена отдельная карта. В тест драйва должны быть включены как точки пересечения линии участка (LOS), так и точки, отличные от LOS. Собранные данные должны представлять типичные сценарии охвата. В городской местности необходимо учитывать влияние ориентации улиц. Выбор тестового маршрута вождения должен основываться на изменениях рельефа, основных автомагистралях и проезжей части, потенциальных зонах затенения и регионе передачи.



Рисунок 8. Пример маршрута драйв-теста

При проведении теста, в основном измеряются следующие параметры:

CSSR – Call Setup Success Rate

DCR — Drop Call Rate

SQI

MOS, например, с использованием тестовых фраз на русском языке в соответствии с ГОСТ-Р

Setup time

Скорость передачи данных GPRS, EDGE, HSPA+, LTE

RxLevel, RSCP, RSRP

C/I, Ec/No, RSRQ

RxQual

Аналогичным решением является пешеходное тестирование, приводящееся без участия автомобиля. Локальные драйв-тесты проводятся с участием инженера для конкретных мест, часто на основании жалобы абонента или же когда невозможно использовать автоматические комплексы (проехать на

машине). Например, в закрытых дворах, торговых центрах, метро и т.п. А также для тестирования новых сервисов и технологий, их применения вживую.

Носимый измерительный комплекс помещается в обычном рюкзаке. Он состоит из сканирующего приемника, нескольких измерительных смартфонов, установленных на специальном шасси, и управляющего устройства. С помощью сканирующего приемника инженер оценивает покрытие сотовой сети, а также просматривает эфир на всех рабочих частотах в конкретном месте. Так, например, можно засечь слабый сигнал от удаленной базовой станции, создающей помеху, или оценить покрытие всех операторов в этой зоне



Рисунок 9. Носимый измерительный комплекс компании Мегафон

Специальная прошивка измерительных смартфонов позволяет управлять их функциями на самом глубоком уровне, вплоть до подключения только к определенному диапазону или базовой станции. В максимальном варианте допускается установка до 8 смартфонов, но, как правило, используется 4-5 устройств – по числу основных тестов. С помощью смартфонов инженер оценивает качество голосовых вызовов MOS (Mean Opinion Score) , скорость передачи данных, качество просмотра видео, работу мессенджеров и другие параметры стандартных сервисов. Полное управление смартфонами осуществляется по Bluetooth, не нужно каждый раз лезть в рюкзак. В качестве контроллера может быть использован смартфон, планшет или ноутбук. Через него инженер запускает прогон того или иного теста на одном или всех смартфонах одновременно, однократно или в циклическом режиме. Log file всех тестов записываются в память смартфонов для последующего анализа в офисе оператора. При необходимости тесты можно провести и через само управляющее устройство. В процессе радиоизмерений инженер может сам оценить выявленную проблему и попытаться в режиме онлайн устранить ее совместно со специалистами, находящимися в офисе.

Далее, собранная информация в результате приведенных в работе тестов, анализируется операторами связи.

Уже у оператора, на основе стационарных и драйв-измерений, формируется полное отображение качества услуг связи (QoS, Quality of Service)

Телефония	SMS	Интернет
Число неуспешных попыток установления голосового соединения Voice Service Non-Accessibility	Доля недоставленных сообщений	Доля неуспешных TCP/IP соединений HTTP IP-Service Access Failure Ratio
Доля обрывов голосовых соединений Voice Service Cut-off Ratio	Время доставки сообщений	Доля неуспешных сессий по протоколу HTTP HTTP SessionFailureRatio
Средняя разборчивость речи на соединение Voice Speech Quality on Call basis(MOS POLQA)		Среднее значение скорости передачи данных к абоненту HTTP DL Mean User Data Rate
Доля голосовых соединений с низкой разборчивостью речи Negative MOS samples Ratio, MOS POLQA < 2,6		Продолжительность успешной сессии HTTP SessionTime

Рисунок 10. Параметры качества услуг для различных типов подвижной связи

Физически, для операторов связи важным показателем является качество связи, поскольку от этого зависит возможность абонентов к подключению к БС

В GSM качество связи определяется одним параметром, RSSI – это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал. Измеряется в децибел на милливатт (dBm)

RSSI	Уровень сигнала	Описание
>= -70 dBm	Отличный	Сильный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -70 dBm до -85 dBm	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -86 dBm до -100 dBm	Средний	Уровень сигнала достаточен для звонков, передача данных с периодическими ошибками
менее -100 dBm	Плохой	Доступ с периодическими разрывами соединения
-110 dBm	Нет сигнала	Нет связи

В UMTS качество связи определяется тремя значениями:

RSSI - это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал.

Измеряется в децибел на милливатт (dBm)

ЕС/Ю – Соотношение мощности канала к интерференции. это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал. Измеряется в децибел на милливатт (dBm)

RSCP – Уровень мощности сигнала текущего ортогонального кода

RSSI	Уровень сигнала	Описание
≥ -70 dBm	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -70 dBm до -85 dBm	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -86 dBm до -100 dBm	Средний	Уровень сигнала достаточен для звонков, передача данных с периодическими ошибками
менее -100 dBm	Плохой	Доступ с периодическими разрывами соединения
-110 dBm	Нет сигнала	Нет связи

ЕС/Ю	Уровень сигнала	Описание
От 0 до -6	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -7 до -10	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -11 до -20	Плохой	Надежная скорость передачи данных может быть достигнута, однако часть пакетов будет потеряна. Когда это значение приближается к -20, производительность резко падает

RSCP	Уровень сигнала	Описание
От -60 до 0	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -75 до -60	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -85 до -75	Средний	Уровень сигнала достаточен для звонков, передача данных с периодическими ошибками
От -95 до -85	Плохой	Возможны перебои в передаче данных
От -124 до -95	Очень плохой	Малая производительность, ближе к -124 отключение

В сетях LTE качество связи описывается 4-мя параметрами

RSSI - это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал.

Измеряется в децибел на милливатт (dBm)

RSRP - среднее значение мощности принятых пилотных сигналов (Reference Signal). Это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал.

Измеряется в децибел на милливатт (dBm)

RSRQ (Reference Signal Received Quality) – характеризует качество принятых пилотных сигналов. Это отрицательное значение, чем больше - тем лучше сигнал. Измеряется в децибелах (dB)

SINR –также называемый CINR (Carrier to Interference + Noise Ratio) – отношение уровня полезного сигнала к уровню шума. Значение SINR измеряется в децибелах (dB). чем больше - тем лучше сигнал. При значениях SINR ниже 0 скорость подключения будет очень низкой, т.к. это означает, что в принимаемом сигнале шума больше, чем полезной части, при этом вероятность потери LTE-соединения также существует.

RSSI	Уровень сигнала	Описание
> -65 dBm	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -65 dBm до -75 dBm	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -75 dBm до -85 dBm	Средний	Уровень сигнала достаточен для звонков, передача данных с периодическими ошибками
От -95 dBm до -85 dBm	Плохой	Доступ с периодическими разрывами соединения
Менее 95 dBm	Нет сигнала	Нет связи

RSRP	Уровень сигнала	Описание
Более -80 dBm	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -80 dBm до -90 dBm	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -90 dBm до -100 dBm	Средний	Средний уровень сигнал. При приближении значения к 0 качество связи сильно падает
Менее -100 dBm	Нет сигнала	Нет сети

RSRQ	Уровень сигнала	Описание
Более -10 dB	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От -10 dB до -15 dB	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От -15 dB до -20 dB	Средний	Средний уровень сигнал. При приближении значения к 0 качество связи сильно падает
Менее -20 dB	Нет сигнала	Нет сети

SINR	Уровень сигнала	Описание
Более 20 dB	Отличный	Отличный сигнал, максимальная скорость передачи данных
От 13 dB до 20 dB	Хороший	Хороший сигнал, с быстрой скоростью передачи данных
От 0 dB до 13 dB	Средний	Средний уровень сигнал. При приближении значения к 0 качество связи сильно падает

В LTE Для каждой абонентской станции UE и каждого частотного блока несущей формируются индикаторы качества канала CQI (Channel Quality Indicator). В зависимости от требуемой для UE скорости передачи данных базовой станцией принимается решение о количестве ресурсных блоков, выделяемых тому или иному пользователю, а какие именно частотные блоки выделять пользователям, зависит от индикатора CQI. Этот параметр в свою очередь зависит от SNR:

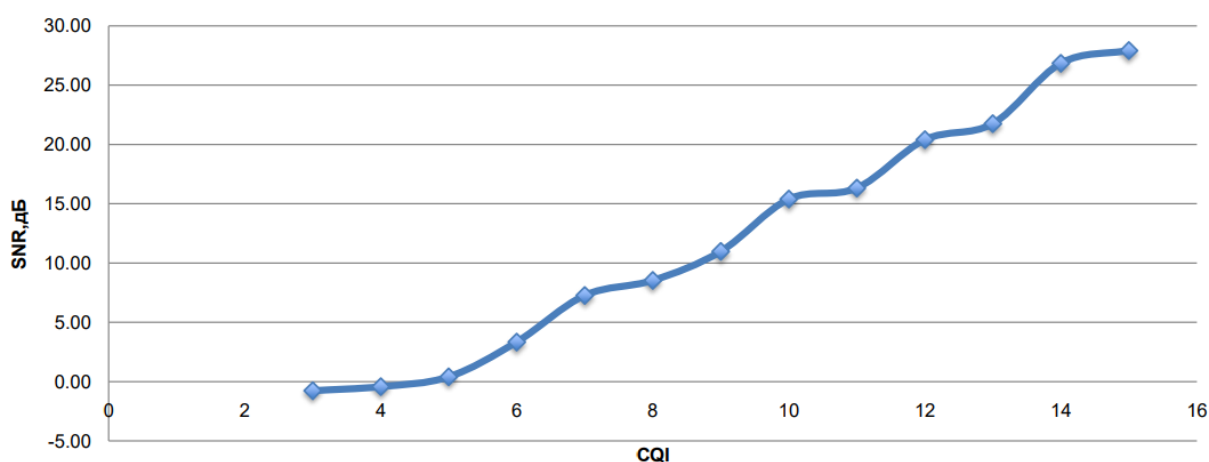


Рисунок 11. Зависимость CQI от SNR

Исходя из полученной информации, можно сделать вывод о преимуществах и недостатках драйв-тестов

Преимущества:

- Тестовое оборудование поддерживает все функции и режимы работы сети;
- Точно известно место и условия, при которых производилось тестирование;
- Нет влияния мотивации абонента на результаты оценки качества услуг;
- KPI понятны любому пользователю

Недостатки:

- Результаты зависят от маршрута, так как всего 20% трафика формируется на Outdoor покрытии;
- Нужен квалифицированный персонал для грамотной пост-обработки данных;
- Сильная зависимость от используемого оборудования, зачастую не соответствующего абонентскому;
- Практически невозможно выполнить измерения в Indoor покрытии

1.2 Анализ внедрения БПЛА в измерения сетей сотовой связи

В данной работе предлагается использование БПЛА в измерениях сетей сотовой связи в дополнение к существующим методам. Главным преимуществом БПЛА является мобильность и быстрота развертывания. Здесь БПЛА не выступает в качестве измерителя, он является вспомогательным инструментом для пешего инженера, или для тестирования на автомобиле, с изначально закрепленным на нем измерительным прибором.

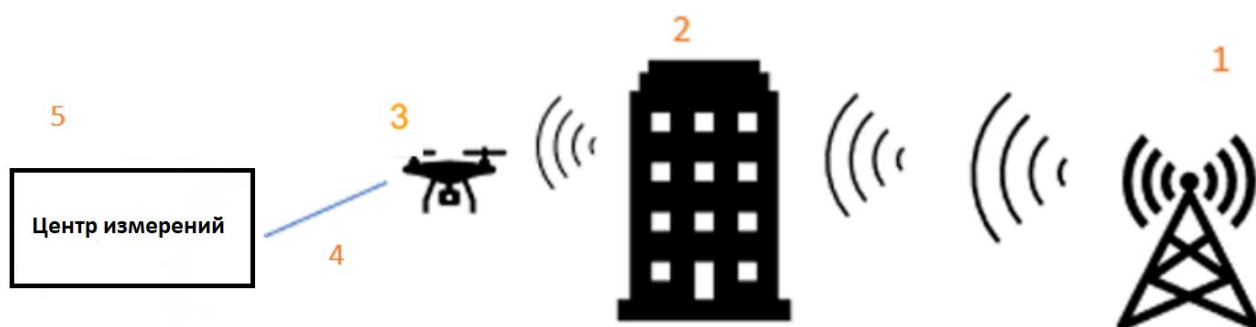


Рисунок 12. Предлагаемый способ сбора данных измерительной платформы на базе беспилотного летательного аппарата

В данном способе:

- 1.Базовая станция
- 2.Основные препятствия, встречающиеся в городской среде
3. БПЛА
4. Беспроводное соединение между БПЛА и центром обработки данных
- 5.Обработка данных происходит в центре измерений

Чтобы оценить обоснованность этого предложения в контексте данной работы в следующих разделах будут анализироваться возможности беспилотного летательного аппарата в сравнении с автомобильным транспортным средством в достижении пространственных разрешений для создания карты покрытия

Ключевым тезисом о необходимости применения данной методики является то, что мобильность БПЛА позволяет использовать его для измерений в тех местах, где автомобильный транспорт проехать не может, а его автономность и дальность полета позволяет облегчить собой работу пешего инженера.

Также , наличие у БПЛА возможности полета по заданному заранее маршруту , позволяет заранее составить план измерений , исходя из которого инженер может производить измерения по техническому заданию

1.3 Математические модели для расчета основных потерь передачи в СПС

Прежде, чем приступить к моделированию и тестированию зоны покрытия, необходимо правильно подобрать модель расчета основных потерь передачи в системах подвижной связи, поскольку каждая модель подходит под конкретные условия и задачи.

МОДЕЛЬ ХАТА (ОКАМУРА – ХАТА)

Для упрощения работы с моделью Окамура была разработана модель Хата для частот 150–1500 МГц, где вместо графических зависимостей составляющих потерь используются аналитические выражения. Модель применима для следующих условий: расстояние от АС до БС 1...20км, высота антенны БС 30...200м, частота $F=150...1500$ МГц, высота антенны АС 1...10м. Таким образом, с учетом поправочного коэффициента получаем следующие уравнения:

Средний и малый город	$\begin{aligned} L = & 68,75 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 27,72 \lg (F) \\ & - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned}$
Большой город ($F \leq 200$ МГц)	$\begin{aligned} L = & 68,45 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 26,16 \lg (F) \\ & - 8,29 (\lg (1,54 H_{MS}))^2 \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned}$
Большой город ($F \geq 400$ МГц)	$\begin{aligned} L = & 74,52 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 26,16 \lg (F) \\ & - 3,2 (\lg (11,75 H_{MS}))^2 \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned}$
Пригород	$\begin{aligned} L = & 63,35 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 27,72 \lg (F) \\ & - 2 (\lg (F/28))^2 \\ & - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned}$

Сельская местность квазиоткрытая	$ \begin{aligned} L = & 32,81 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 46,05 \lg (F) \\ & - 4,78 (\lg (F))^2 \\ & - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned} $
----------------------------------	---

Сельская местность пустынная	$ \begin{aligned} L = & 27,81 - 13,82 \lg (H_{BS}) \\ & + 46,05 \lg (F) \\ & - 4,78 (\lg (F))^2 \\ & - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_{MS} \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \\ & \cdot \lg (R) \end{aligned} $
------------------------------	---

Модель КОСТ 231 – Хата

Модель применима для диапазона частот 1500–2000 МГц , расстояние от АС до БС 1...20км , высота антенны БС 30...200м , высота антенны АС 1...10м . Таким образом , с учетом поправочного коэффициента получаем следующие уравнения :

Средний город и пригородны й центр с умеренной плотностью посадки деревьев	$ \begin{aligned} L = & 45,5 - 13,82 \lg (H_{BS}) + 35,4 \lg (F) - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H_M \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \cdot \lg (R) \end{aligned} $
--	---

Центр столичного города	$ \begin{aligned} L = & 48,5 - 13,82 \lg (H_{BS}) + 35,4 \lg (F) - (1,1 \lg F - 0,7) \cdot H \\ & + (44,9 - 6,55 \lg (H_{BS})) \cdot \lg (R) \end{aligned} $
-------------------------------	---

Модель ЭРИКСОНА 9999

Представляет собой расширение модели Окамура – Хата для частот $F \geq 1500 \text{ МГц}$

Потери на трассе рассчитываются по следующей формуле:

$$L = a_0 + a_1 \times \lg(R) + a_2 \times \lg(h_t) + a_3 \times \lg(h_t) \times \lg(R) - 3,2 \times (\lg(11,75 \times h_r))^2 + 44,49 \times \lg(f) - 4,78 \times (\lg(f))^2,$$

Где – f частота передаваемого радиосигнала (МГц); h_t – высота передающей антенны (м); h_r – высота приемной антенны (м); R – расстояние между АС и БС (км). Значения коэффициентов, a_0 a_1 a_2 a_3 , и указаны в таблице

Тип местности	A_0	A_1	A_2	A_3
Городская	36.2	30.2	12	0.1
Пригородная	43.2	68.93	12	0.1
Сельская	45.95	100.6	12	0.1

Модель CCIR

Модель применима для диапазона частот 150–1000 МГц, расстояние от АС до БС 1...20 км, высота антенны БС 30...200 м, высота антенны АС 1...10 м. Потери на трассе рассчитываются по следующей формуле:

$$\begin{aligned} L &= A + B \times \lg(R) - E, \\ A &= 69,55 + 26,16 \times \lg(f) - 13,82 \times \lg(h_t) - \\ &\quad - (1,1 \times \lg(f) - 0,7) \times h_r + 1,56 \times \lg(f) - 0,8, \\ B &= 44,9 - 6,55 \times \lg(h_t), \\ E &= 30 - 25 \times \lg(PB), \end{aligned}$$

Где

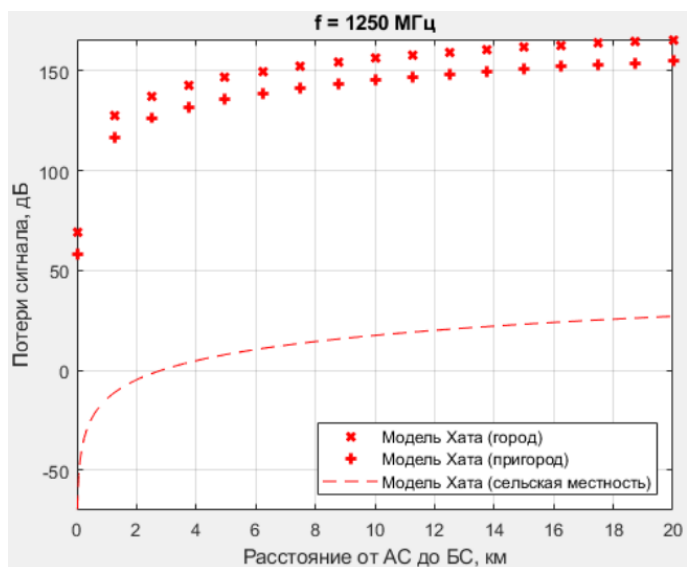
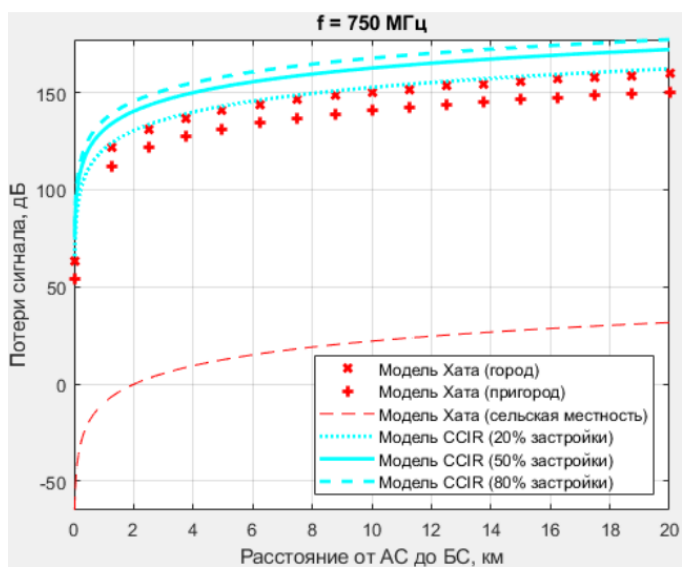
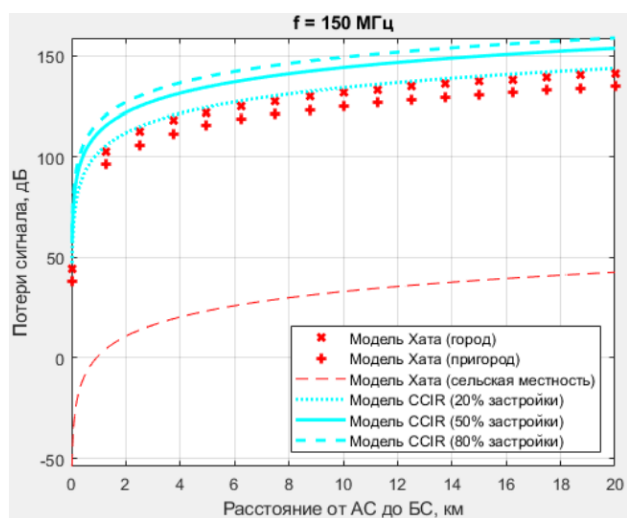
PB – процент застройки местности (%); f – частота сигнала (МГц); h_t – высота передающей антенны (м); h_r – высота приемной антенны (м)

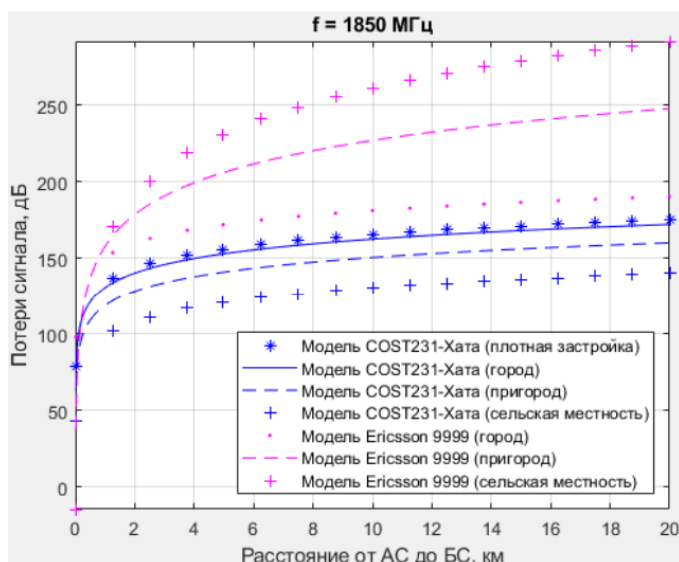
Сравнение эмпирических моделей в городской застройке

Название модели	Диапазон частот (МГц)	Трасса (км)	Высота антенны БС(м)	Высота антенны АС(м)	Особенности
CCIR	150 – 1000	1 – 20	30-200	1-10	Учитывается коэффициент застройки
Окамура – Хата	150-1500	1-20	30-200	1-10	Применима для большинства условий
COST231 – Хата	1500-2000	1-20	30-200	1-10	Небольшой частотный диапазон
Эриксона 9999	От 1500	1-20	30-200	1-10	Применима для большинства современных стандартов связи

Графики затухания сигнала для рабочих частот 150, 750, 1250 и 1850 МГц, рассчитанные в соответствии с вышеуказанными моделями и с учетом применимости в различных диапазонах частот, представлены на рисунках ниже.

В связи с тем, что эмпирическая модель Хата основана на данных модели Окамура, заменяя графические вычисления поправочных коэффициентов аналитическими выражениями, модель Окамура далее рассматривать не будем. Для диапазонов частот 1000–1500 МГц и 1500–2000 МГц требуется сформировать эмпирическую модель расчета потерь сигнала, учитывающую коэффициент застройки местности (по аналогии с моделью CCIR для диапазона частот 150–1000 МГц). В частности, для диапазона частот 1000–1500 МГц для построения модели возможно использование модели Хата (Окамура – Хата), для 1500–2000 МГц – моделей COST231 – Хата и Эриксона 9999





Исходя из полученной информации можно сделать вывод, что данные модели пригодны как при использовании в городской застройке, так и в сельской местности, однако, их нельзя применить для исследования затухания методом многоуровневого зонирования, поскольку в них высота АС ограничивается 10 метрами, что не подходит для исследования параметров сигнала на большей высоте. В связи с этим, нужно рассмотреть другую модель.

Модель ITM (Irregular Terrain Model) Лонгли–Райса

Допустимый диапазон частот от 20 МГц до 20 ГГц. Расстояние от АС до БС 1...2000 км, высота БС от 1...3000 м

При прогнозировании распространения радиоволн модель Лонгли–Райса учитывает неоднородности рельефа местности. Также данная модель имеет относительно малую чувствительность к частоте сигнала, позволяющую вести расчет для достаточно широкополосного сигнала, сводящийся к расчету для центральной частоты. В данном случае реализован режим прогнозирования распространения радиоволн «точка-точка», при котором мощность полезного сигнала на приемной стороне зависит от геометрии трассы распространения радиоволны в выбранной местности, рефракции атмосферы и заданных характеристик направленности антенны приемопередающего оборудования. В общем случае мощность полезного сигнала на приемной стороне можно представить в виде следующего выражения:

$$P_{rx} = P_{tx} - \eta_{tx} + G_{tx} - A_0 - \eta_{rx} + G_{rx}$$

где P_{tx} - выходная мощность передатчика; η_{tx}, η_{rx} — потери в антенном фидере передатчика и приемника; G_{tx}, G_{rx} — коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника; A_0 - результирующее ослабление радиосигнала на трассе.

Результирующее ослабление A_0 радиосигнала при распространении согласно модели ЛонглиРайса определяется потерями в свободном пространстве, дифракцией, тропосферным рассеянием и статистическими параметрами изменчивости условий распространения:

$$A_0 = A_{fs} + A_{ref} + A_{var}$$

где A_{fs} - ослабление свободного пространства; A_{ref} — ослабление дифракцией и рассеянием радиоволны; A_{var} - ослабление изменчивостью условий распространения.

Ослабление радиоволны при распространении в свободном пространстве вызвано сферической расходимостью фронта волны и определяется как длиной волны, так и расстоянием передачи

$$A_{fs} = 20 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right),$$

где d - протяженность трассы распространения; f - частота радиоволны; c - скорость света.

Ослабление A_{ref} определяется совместным действием дифракции, рассеяния и поглощения радиоволны:

$$A_{ref} = A_{diff} + A_{scatt} + A_a,$$

где A_{diff} - ослабление дифракцией радиоволны; A_{scatt} - ослабление рассеянием радиоволны; A_a — ослабление поглощением атмосферы.

Дифракционные потери A_{diff} при распространении радиоволны вызваны наличием преграждающих препятствий на пути распространения. Для трасс, где расстояние между передающей и приёмной станциями меньше, чем расстояние до их собственного радиогоризонта, дифракционные потери могут возникать на выступах земной поверхности вследствие неравномерности рельефа местности на трассе. Для загоризонтных трасс, на которых расстояние между передающей и приёмной станциями больше, чем расстояние до их собственного радиогоризонта, дифракционные потери возникают преимущественно там, где радиоволна пересекает линию горизонта. Потери, вызванные тропосферным рассеянием, A_{scatt} проявляются

вследствие диэлектрической неоднородности тропосферы при условии, что размеры неоднородностей превышают длину волны передаваемого сигнала. Диэлектрическая неоднородность тропосферы возникает вследствие локального изменения давления, температуры и влажности, что приводит к локальному изменению коэффициента преломления атмосферы. Расчет потерь, вызванных дифракцией и рассеянием в модели Лонгли–Райса, производится на основе законов геометрической оптики. Ослабление A_a , вызванное поглощением радиоволны атмосферными газами, происходит в результате потерь энергии радиоволны в кислороде и парах воды и определяется плотностью водяных паров и температурой вблизи поверхности трассы распространения.

Ослабление A_{var} , учитывающее вероятностный характер изменчивости условий распространения на заданной трассе, определяется следующим образом;

$$A_{var} = -V_{med} - Y_T - Y_L - Y_S,$$

где V_{med} - среднегодовое медианное значение потерь; Y_T - потери, вызванные изменчивостью среднечасовых значений затухания; Y_L - потери, вызванные изменчивостью местоположения в пространстве; Y_S - потери, вызванные изменчивостью ситуаций при измерениях.

Статистический параметр среднегодового медианного значения потерь V_{med} определяет медианное значение потерь, которое зависит от климата в рассматриваемом регионе местности. Параметр изменчивости во времени Y_T учитывает изменения среднечасовых значений затухания, например, из-за медленных изменений атмосферной рефракции или интенсивности атмосферной турбулентности. Параметр изменчивости местоположения Y_L учитывает какие-либо вариации рельефа местности в долгосрочной статистике, которые происходят на трассе распространения. Параметр изменчивости ситуации Y_S учитывает эффекты изменения условий и результатов измерений мощности, возникающих в результате действия неизвестных переменных параметров системы и условий распространения радиоволн.

Перед расчетом ослабления, вносимого радиотрассой, определяются геометрические параметры радиолинии. Геометрические параметры радиолинии определяются взаимным расположением передающей и приемной станций с учетом кривизны рельефа местности. К основным геометрическим параметрам радиолинии относятся: фактическое расстояние по гладкой земле d (без учета неравномерности рельефа) между передающей и приемной станцией, среднее значение высоты над уровнем моря на

протяжении всей радиолинии h_s , величина, обратная эффективному радиусу Земли γ_e в местности радиотрассы, комплексный импеданс почвы z_g в местности заданной трассы, расстояние до радиогоризонта для передающей и приемной станции d_h , угловое расстояние θ , высоты антенн передающей и приемной станций h_a

Величина, обратная эффективному радиусу Земли, определяется следующим образом:

$$\gamma_e = \frac{\left(1 - 0,04665 \cdot \exp\left(\frac{N_s}{179,3}\right)\right)}{R}$$

где N_s - приведённый к h_s коэффициент рефракции

$$N_s = N_0 \exp\left(-\frac{h_s}{9460}\right),$$

где N_0 - среднее значение рефракции у поверхности земли

$$z_g = \sqrt{\varepsilon + j376,62 \frac{\sigma}{f}},$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость почвы; σ - электрическая проводимость

Расстояние до радиогоризонта в общем с. определяется следующим образом:

$$d_h = \sqrt{\frac{2h_a}{\gamma_e}}.$$

В случае если расстояние по гладкой земле между передающим и приемным пунктами меньше, чем их радиогоризонт, то такой случай соответствует связи в пределах прямой видимости. Для трасс прямой видимости в качестве радиогоризонта может быть принято расстояние до какого-либо препятствия на трассе распространения радиоволны

$$\theta = d_L \gamma_e + \theta_{et} + \theta_{er},$$

где θ_{er}, θ_{et} — углы возвышения радиогоризонт передатчика и приемника.

Угол возвышения радиогоризонта определ: следующим образом:

$$\theta_e = \frac{h_L - h_a}{d_h} - 2d_L\gamma_e$$

где h_L – высота препятствия над средним уровнем моря в точке касания с линией прямой видимости. В пределах прямой видимости на ровном участке местности угловые величины могут иметь значения, близкие к нулю и могут не учитываться

Таким образом, данный метод позволяет. Вычислить потерю на пути от потери свободного пространства, ландшафта и дифракции препятствия, наземного отражения, атмосферного преломления и тропосферного рассеяния.

Обеспечивая оценку потери на пути путем объединения физики с эмпирическими данными. Данный метод является наиболее подходящим для использования его при многоуровневом расчете и измерениях, поскольку позволяет задавать такие параметры , как :

Поляризация антенны

Проводимость земли

Относительная проницаемость земли

Рефракция

Параметры атмосферы

Изменчивость рельефа

Высота нахождения АС

Пример работы модели в программной среде

Заданные параметры : Карта местности из OpenStreetMap , высота БС, мощность излучателя БС , частота , Ку антенны , потери в фидере .

Параметры рельефа задаются автоматически

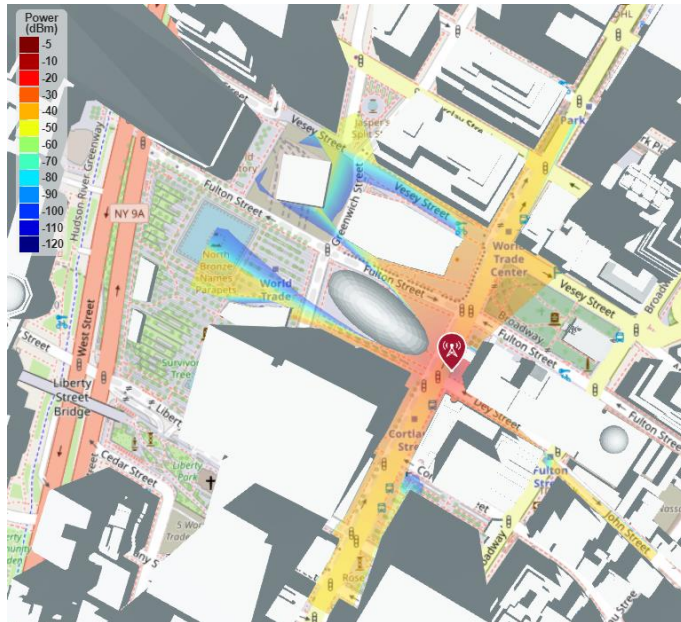


Рисунок 14. Пример моделирования в среде matlab

2. Предлагаемая модель измерения покрытия на основе БПЛА

Ранее в работе описывались преимущества БПЛА по сравнению с традиционными методами сбора данных. Существуют различные проекты, позволяющие программно проводить измерения моделью Лонгли–Райса, однако в данной работе была выбрана программа Matlab, поскольку в ней существуют такие дополнения, как “AntennaToolbox”, позволяющие проводить подобное моделирование, в котором можно задавать различные параметры исследования. В данной работе основным параметром исследования служит различие карты покрытия при различных высотах нахождения измерительной установки, среда matlab позволяет провести такое моделирование. В таблице ниже приведены параметры, которые можно задать работая в среде matlab. Генерация карты покрытия будет указана с различными переменными значениями, включая генерацию на разных высотах. Исходный код будет вложен в приложение 1

Параметр	Значения
Территория моделирования	Центр г. Вашингтон из OSM
Локация БС	Широта 38.90567183758209 Долгота -77.03989679655152
Высота подвеса БС	15м
Максимальное число отражений волн	10
Материал зданий	Бетон
Максимальная дальность покрытия	500м (подходит для LTE)
Высота зоны измерения	1, 10, 20 м
Мощность передатчика	46 дБм
Частоты передатчика	2620-2690 МГц
Атмосферные эффекты	Без эффектов, дождь

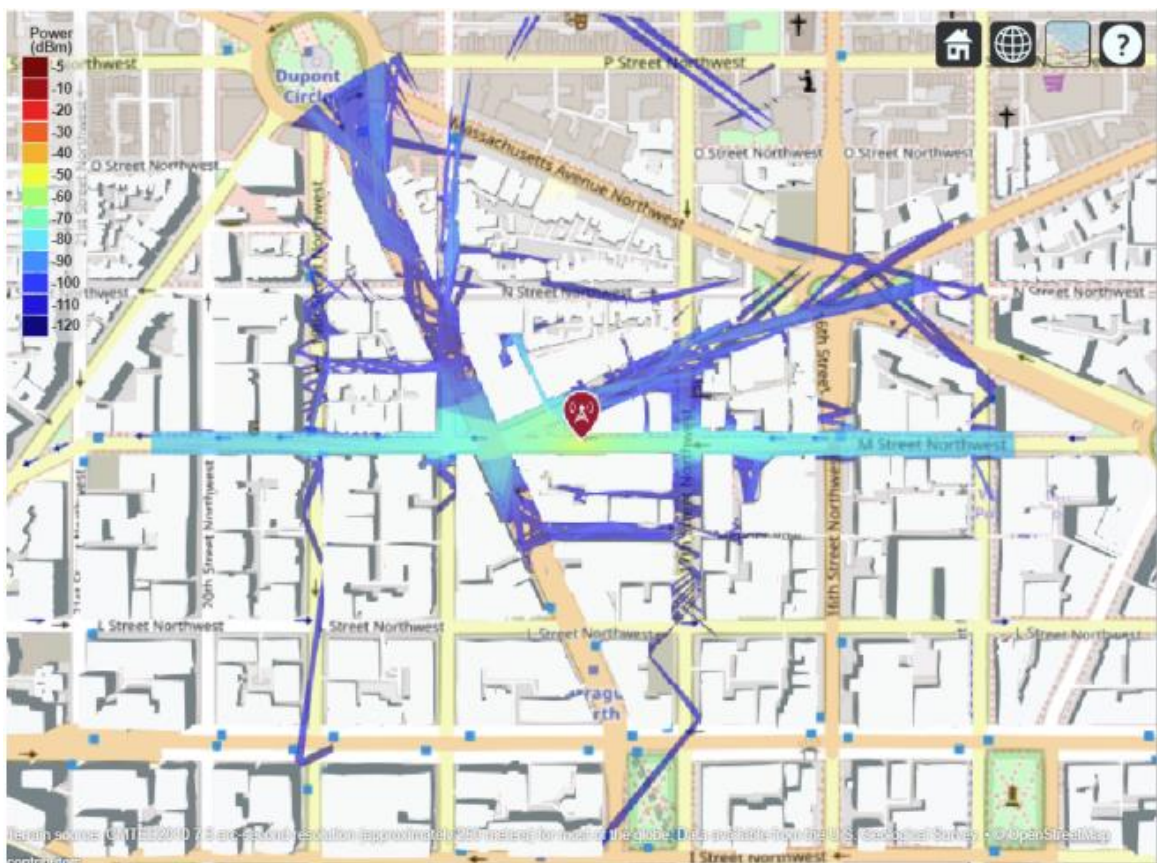


Рисунок 15. Стандарт LTE, зона измерения 1м, без погодных эффектов

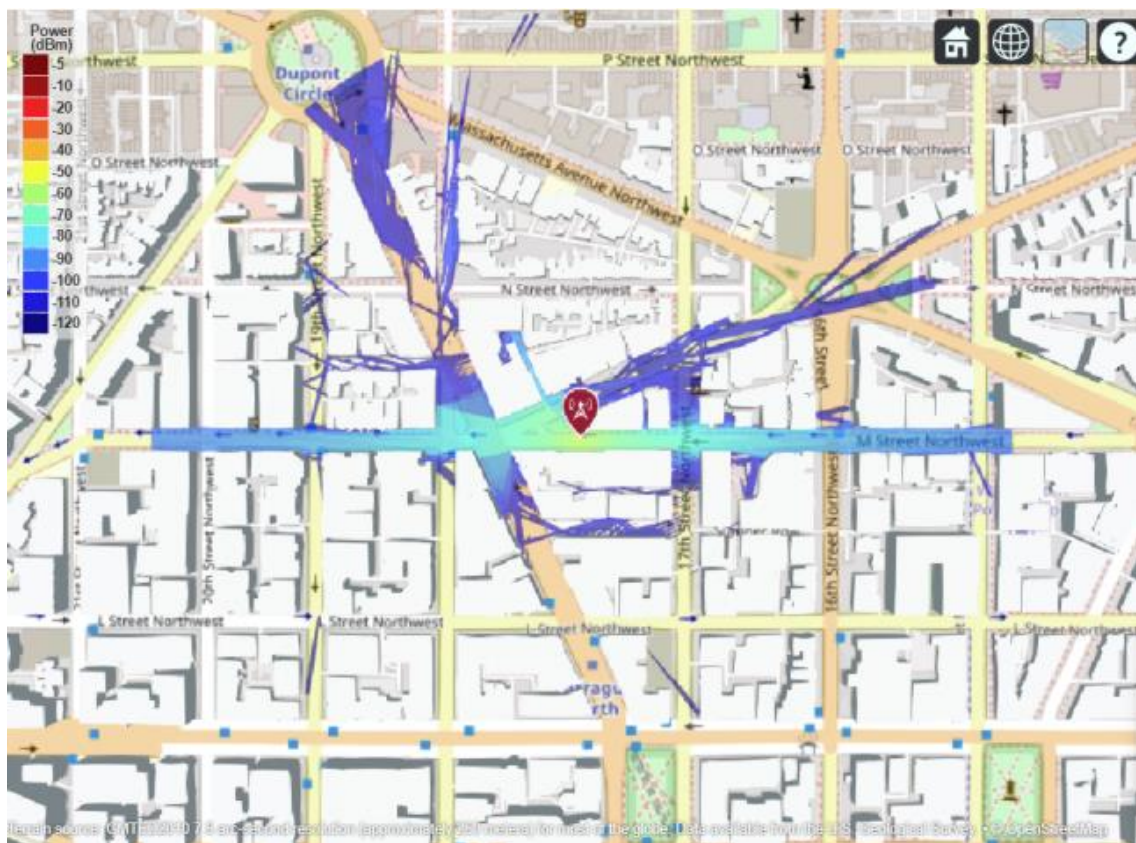


Рисунок 16. Стандарт LTE, зона измерения 1м, дождь

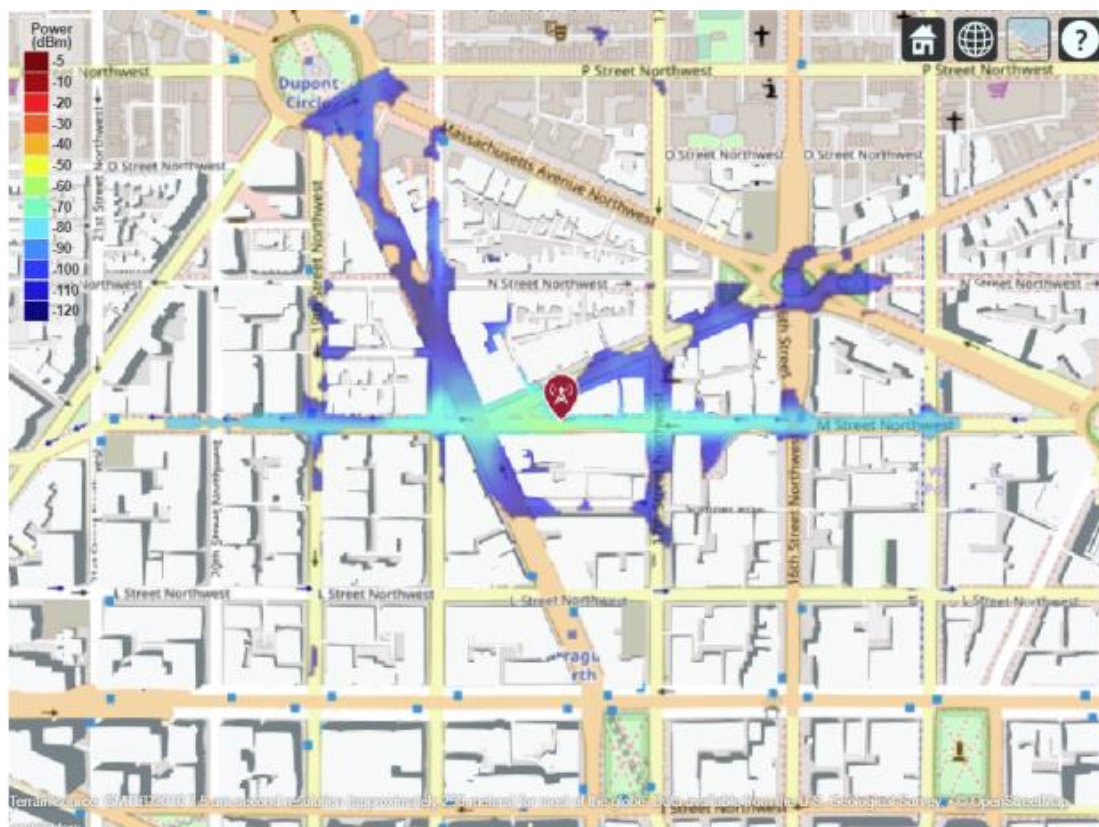


Рисунок 17. Стандарт LTE , зона измерения 10м, без погодных эффектов

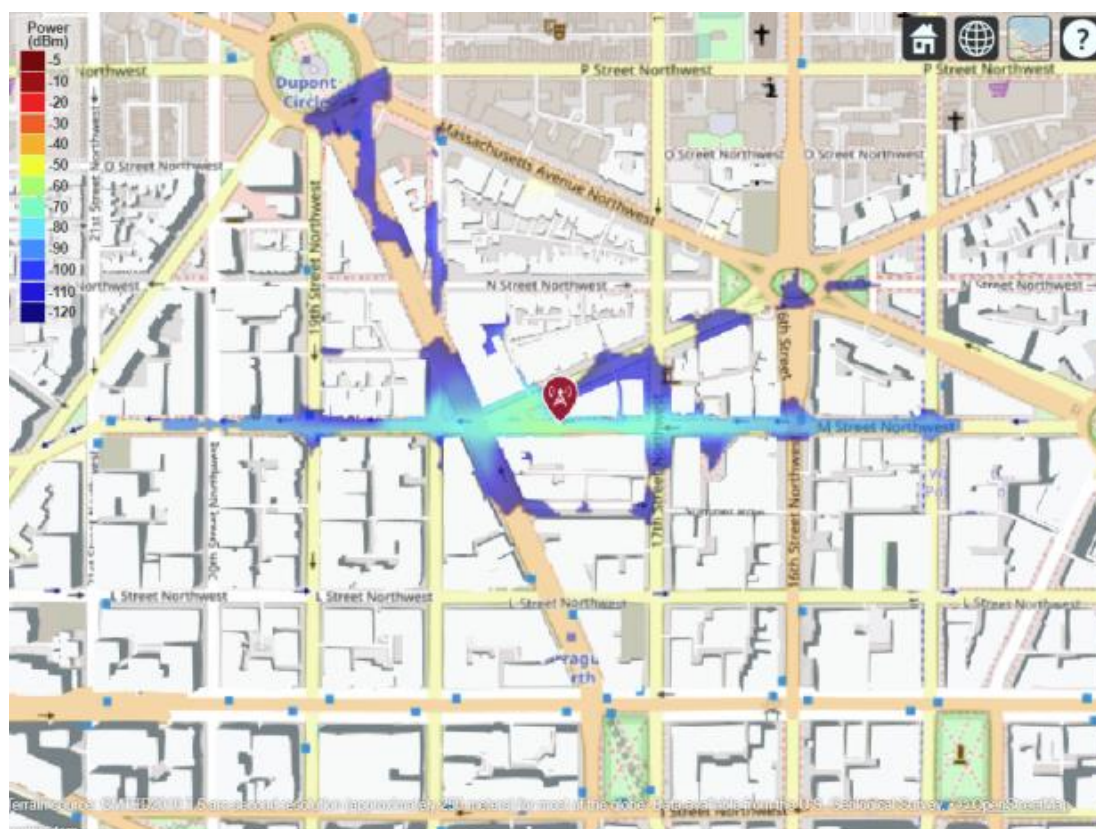


Рисунок 18. Стандарт LTE , зона измерения 10м, дождь

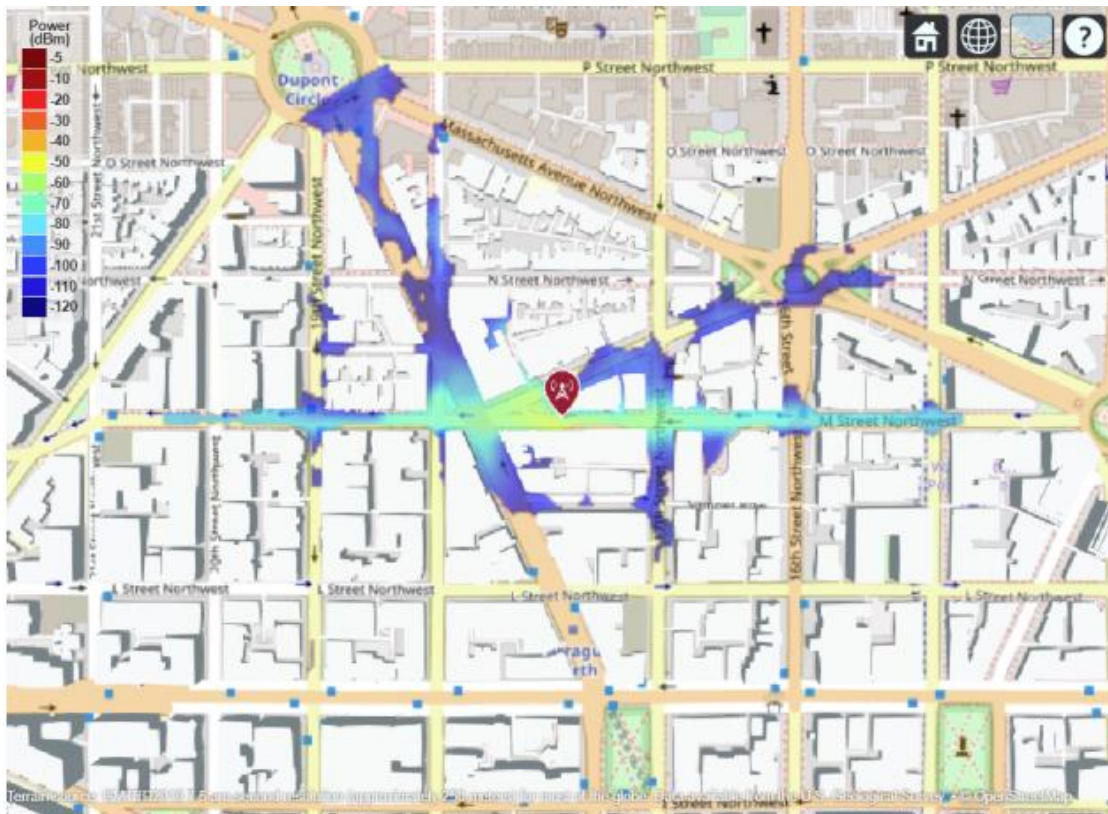
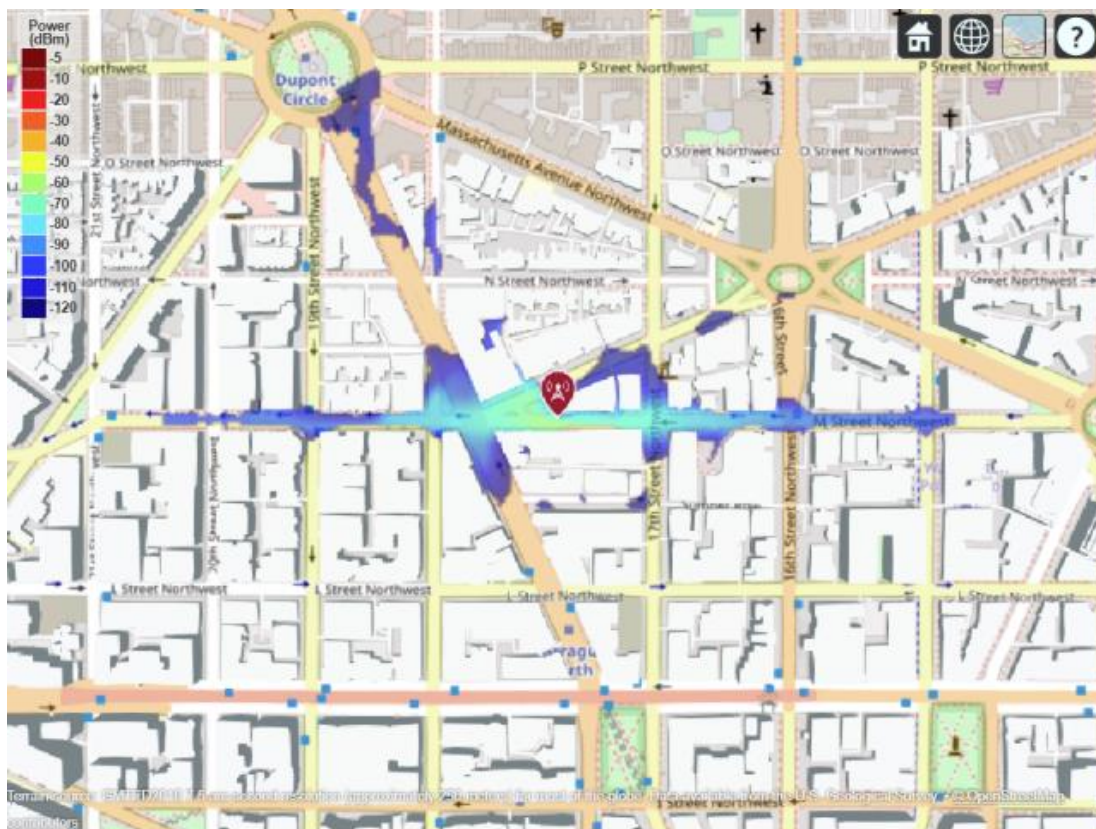


Рисунок 19. Стандарт LTE , зона измерения 20м, без погодных эффектов



Анализ полученных результатов

Полученные в ходе измерений результаты могут соответствовать реальным результатам тестовых измерений . Действительно , при наличии на участке осадков , радиус покрытия снижается . Так же , учитывается отражение и препятствия , такие как бетонные строения , которые в данной местности не сильно превышают высоту подвеса антенн .

Стоит отметить , что обычно , антенны механически направлены с небольшим углом наклона (1-3) градуса вниз , что в данной среде не учитывается , поэтому имеет место быть в пределах погрешности расхождения с действительными значениями , которые могут быть получены только при измерениях непосредственно в зоне нахождения БС.

Поскольку основная задача данной работы , это создание исследование многоуровневого зонирования , то нужно ознакомиться с результатами моделирования на разных высотах .

Так , действительно , с увеличением высоты измерения , уменьшается зона покрытия , что отражается на графиках . Стоит отметить , что программа на данном этапе не дает выбрать тип антенны , поскольку в зависимости от ее диаграммы направленности , результаты могут отличаться .

Можно сделать вывод о том , что при существующей конфигурации , данный метод отражает действительные результаты с долей погрешности , что может быть устранено при написании программного продукта полностью на своей платформе .

Но стоит отметить , что несмотря на погрешность , математическая модель Лонгли–Райса является оптимальной для исследования зоны покрытия на основе БПЛА , поскольку другие модели не способны работать с таким количеством параметров , как данная модель .

3. Возможности создания дальнейшего исследовательского проекта

Изложенные в первой части работы перспективы развития методов использования БПЛА для различных целей в системах подвижной связи , в настоящее время являются наиболее перспективными . Поэтому , в работе делается акцент не на техническую составляющую , а на применении БПЛА в исследованиях покрытия сигнала и благоприятной математической модели для этих исследований .

Это дает дополнительную информацию о возможностях реализации данного метода в будущем , создании программно-аппаратной платформы для дальнейших исследований и непосредственного практического использования полученной информации .

Из-за относительной доступности БПЛА , а также доступности программно-аппаратных средств для исследований и создания платформенных решений , можно точно сформировать начальную приближенную модель программно-аппаратной платформы

Аппаратная часть платформенного решения

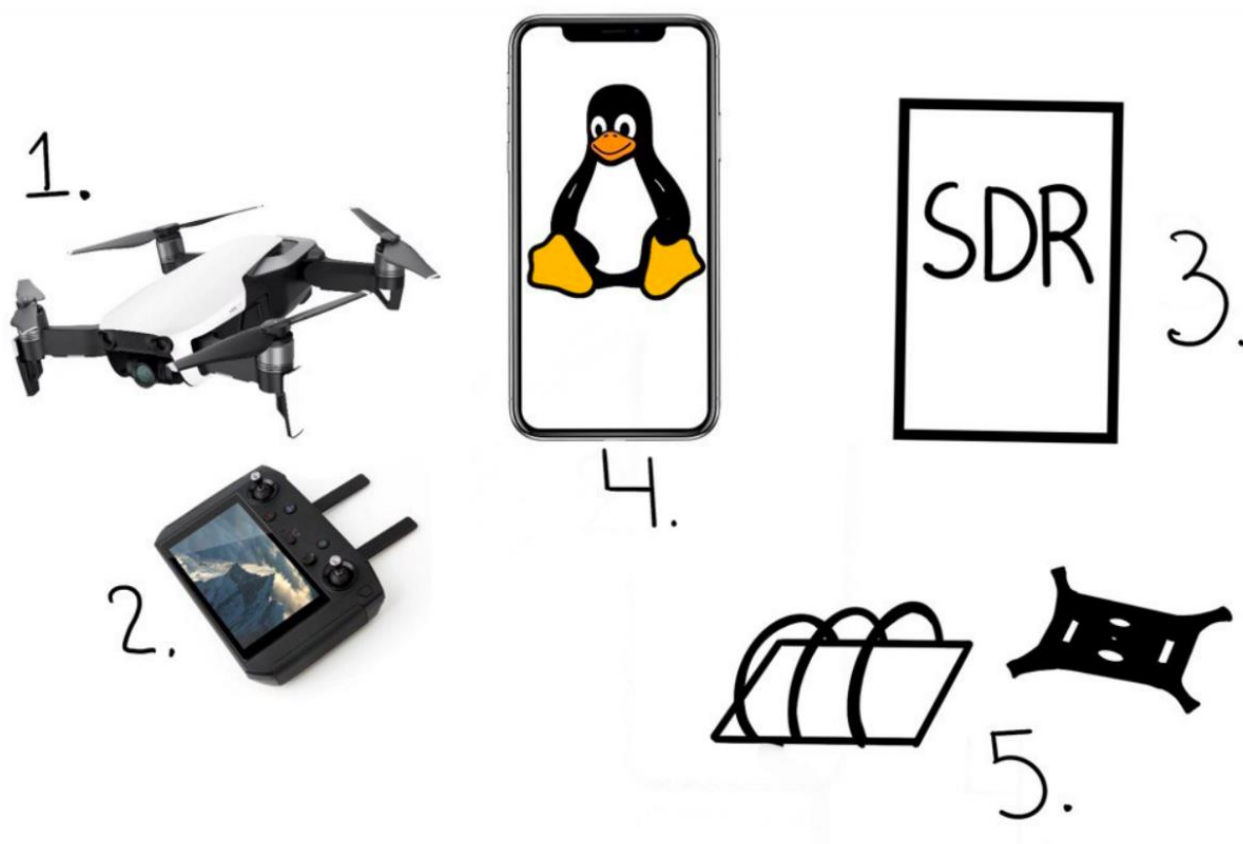


Рисунок 21. Графическое представление аппаратной части решения

1. корпус БПЛА
2. Контроллер
3. SDR-приемник
4. Мобильный терминал с предустановленным ПО
5. Крепления для оборудования

Важной особенностью данного решения является БПЛА с системой GPS , оснащенное аккумуляторными батареями . Возможности управления джойстиком для потенциальной автономности и применимости данного вида решения инженерами-тестировщиками . Обязательно наличие SDR приемника для записи и хранения log-файлов , который может быть либо автономным , с последующей обработкой данных с персонального компьютера , либо соединен для передачи данных с мобильной станцией . Если рассматривать решение с мобильной станцией , то необходимо , чтобы на ней была предустановлена ОС linux , которая представляет собой открытую ОС , программные решения для которой совместимы с приложениями на персональном компьютере . А так же , детали 3D печати , которые могут понадобиться для крепления оборудования на БПЛА .



Рисунок 22. Процесс контролируемого сбора данных

1. Пространство исследования
2. Передача сигнала от БС к SDR-приемнику
3. БПЛА, оснащенный оборудованием для сбора данных, для дальнейшей их передачи
4. Программно-аппаратная система централизации данных
5. Схема управления БПЛА

Метод, предложенный на рисунке 22 все еще не представляет полностью практическую ситуацию, поскольку существуют ограничивающие применения модели факторы помех от близлежащих устройств и частоты, используемые в процессе, должны соответствовать требованиям ГКРЧ. Тем не менее, возможность разработки этой системы по-прежнему полезна, особенно если речь идет о беспилотных летательных аппаратах, позволяющих осуществлять измерения на разных высотах. В дальнейшем, в зависимости от успеха при разработке этой системы возможно тестирование в реальных городских сценариях, с преобразованием модели под реальное использование.

Программная часть платформенного решения

Данное решение нуждается в программной части, поскольку после сбора данных, необходимо провести их качественную обработку. Существующие решения для тестов, позволяют проводить измерения только при непосредственном подключении анализатора к персональному компьютеру инженера-тестировщика, либо же, автономный сбор данных с последующим подключением. Данная схема не подходит для использования ее на основе БПЛА, поскольку персональный компьютер хоть и может автономно использоваться и крепиться на корпусе БПЛА, он тем не менее требует постоянного контроля со стороны инженера-тестировщика, к тому же, имеет внушительные габариты, что существенно увеличивает размер БПЛА и его время автономной работы, что сказывается на стоимости построения такого решения. Предложенная ранее схема использования мобильного устройства с предустановленным ПО для данной схемы является наиболее оптимальной, поскольку мобильное устройство может осуществлять передачу данных непосредственно в сети интернет, что в рамках исследовательских работ в черте города, является удачным решением.

Однако, при исследовании покрытия вне города, либо при недостаточной скорости соединения, данное решение не является актуальным. Наиболее вероятным сценарием использования мобильного терминала будет

упрощение работы инженера-тестировщика , который сможет проводить настройку SDR-приемника и собирать данные без использования персонального компьютера , особенно это актуально при пешеходных маршрутах следования , когда тестирование производится без наличия автомобильного транспорта . Либо же , при развертывании БС сетей нового поколения , мобильное устройство может подключаться к существующим БС LTE , которые , как уже ранее упоминалось в разделе 1 , в сетях 5G NR будут являться резервными , подключение к которым будет осуществляться либо при отсутствии покрытия , либо при перегрузке трафиком сетей нового поколения .

Таким образом , данное решение может использоваться при различных сценариях , что является ключевым фактором дальнейших исследований и разработок в этой области .

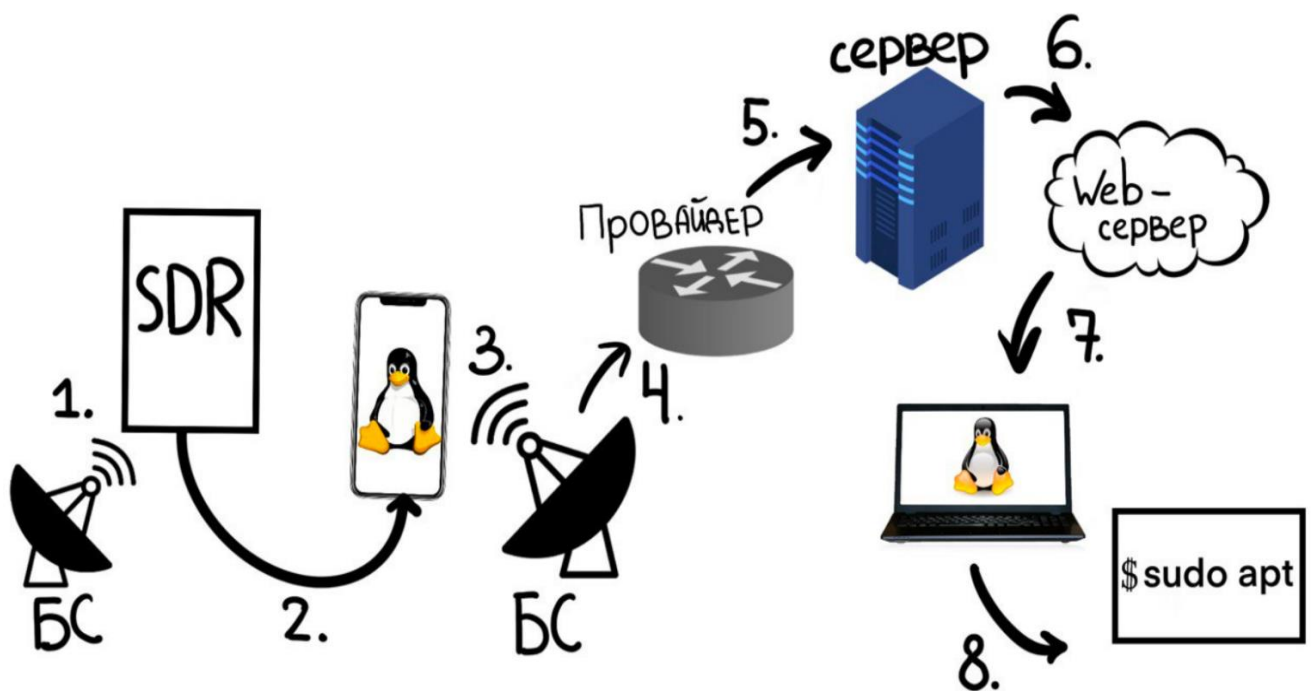


Рисунок 23. Графическая схема программной части аппаратного решения

1. Передача от БС (LTE/ 5G NR) к SDR-приемнику
2. Передача log-файлов от SDR-приемника , к мобильному терминалу
3. Передача собранных данных от мобильного терминала к БС (LTE/5G NR)
4. Передача данных от БС к провайдеру услуг
5. Передача пакетных данных от провайдера на сервер
6. Передача данных от сервера на веб-сервер
7. Подключение к веб-серверу удаленно инженера с персонального компьютера
8. Интерфейс программного продукта , размещенного на веб-сервере

Такая модель позволяет инженеру удаленно подключаться из любой точки мира к веб-серверу , на котором существует веб-версия программного продукта для сбора и анализа данных . Данные могут храниться на дисковом пространстве сервера , выделенным поставщиком услуг . Данная схема существенно автоматизирует процесс измерений и исследования , поскольку данную работу может выполнять как инженер , который осуществляет запуск БПЛА по заранее прописанному маршруту , параллельно изучая информацию , поступившую на веб-сервер , так и позволяет диверсифицировать работу между несколькими сотрудниками , поскольку часть работы может выполняться удаленно . Например , при одновременном исследовании нескольких площадок , обработкой данных в режиме реального времени может заниматься один сотрудник , находящийся удаленно , он же , при необходимости , может скорректировать маршрут и методы проводимого исследования исходя из данных , полученных от инженеров-тестирующих .

В данной задаче представляет сложность развертывание web-сервера, на котором будет осуществляться обработка полученных данных. Сервер должен быть доступен с любого адреса , а так же обладать защищенным соединением , выделенным только для конкретного сотрудника

Большим плюсом данной системы является то , что существующие программно-измерительные продукты могут быть установлены на web-сервер , поскольку оптимизированы для работы на unix-подобных системах , какими часто являются сервера .

В приложении 2 приведен пример развертывания web-сервера с обратным прокси-сервером nginx , собранным вместе с алгоритмом сжатия данных brotli , для дальнейших практических и исследовательских применений проекта . Программную back-end версию , написанную на любом языке , можно собрать на сервер с помощью docker-compose , а благодаря

контейнеризации проекта , его можно загрузить на git площадку для повторных усовершенствований и изменений исходного кода проекта .

В приложении 3 к проекту будет ссылка на git-hub репозиторий с хранящейся на нем одной из версий модели Лонгли–Райса

В приложении 4 к проекту будет ссылка на git-hub репозиторий с хранящимся на нем описанием запуска и установки web-сервера .

При проделанной работе , на хостинге с развернутым web-сервером при загруженной на нем веб-версии программного решения , были получены следующие значения загруженности системы :



Рисунок 23. Нагрузка на web-сервер при развертывании веб-интерфейса

Заключение

Исходя из проделанной работы можно сделать вывод о том , что данное решение на текущий момент является наиболее перспективным и востребованным .

Использование математической модели Лонгли–Райса позволяет проводить многоуровневое зонирование с использованием БПЛА при исследовании покрытия сети сотовой связи , чему способствует доказанная программными и теоретическими исследованиями работоспособность данной математической модели , а так же ее применимость в создании программно-аппаратных продуктов для практического использования

Стоит отметить , что на текущий момент времени , при стремительном развитии сетей нового поколения , нужны новые , нетривиальные решения , каким является использование БПЛА инженерами-тестирующими

Существующие программные решения уже сейчас позволяют в полной мере проводить подобные измерения , которые будут востребованы не только среди операторов связи , но и в среде научных центров , в крупных бизнес компаниях .

Отдельно стоит сказать , что данные , составленные в этой работе можно будет применить не только в будущем , для развертывания сетей нового поколения , но уже сейчас . Помимо абонентских мобильных устройств , в доступности и распространенности сети нуждаются возможные VoIP решения , датчики , аппаратные комплексы , которые могут быть развернуты на любом уровне , что лишний раз подтверждает актуальность данного метода измерений не только среди физических лиц , но и среди коммерческого сегмента операторов сотовой связи .

Список источников

1. S. Tan, C. Dun, F. Jin and K. Xu, "UAV Control in Smart City Based on Space-Air-Ground Integrated Network," 2021 International Conference on Internet, Education and Information Technology (IEIT)
2. Helka-Liina Määttänen, "3GPP Standardization for Cellular-Supported UAVs," in UAV Communications for 5G and Beyond , IEEE
3. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/smart-city>
4. "Cellular-Connected UAV: Potentials, Challenges and Promising Technologies" Yong Zeng, Jiangbin Lyu, and Rui Zhang, IEEE
5. "Разработка алгоритмов передачи потоковых данных на прикладном уровне в сетях беспилотных летательных аппаратов" Васильев Д.С
6. G. Sati, S. Singh, "A review on drive test and site selection for Mobile Radio Communication
7. <https://www.telecomhall.net/t/what-is-rf-drive-test-testing/6392>
8. AN OVERVIEW OF COLLISION AVOIDANCE APPROACHES AND NETWORK ARCHITECTURE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) Ahmad H. Sawalmeh, Noor Shamsiah Othman
9. <https://www.businessinsider.com/flying-cows-bring-cell-service-to-areas-impacted-natural-disast>
10. Wang H., Zhang P., Li J., You X. Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems. China Communications,2019
11. <http://1234g.ru/4g/lte/uslugi-v-setyakh-lte/kachestvennye-pokazateli-i-ikh-obespechenie-v-setyakh-lte?ysclid=lfcuefecg0784482197>
12. <http://1234g.ru/4g/lte/planirovanie-setej-lte/chastotnoe-planirovanie-setej-lte>
13. LTE Theory to Practice- KPI Optimization (A 4G Wireless Technology) Damini Rai, Abhishek Dwivedi
14. https://www.rpls.ru/ru/_services/drive-tests/
15. B. Shang, V. Marojevic, Y. Yi, A. S. Abdalla and L. Liu, "Spectrum Sharing for UAV Communications: Spatial Spectrum Sensing and Open Issues," in IEEE Vehicular Technology Magazine

16. Zhang L., Zhao H., Hou S., Zhao Z., Xu H., Wu X., Wu Q., Zhang R. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks. IEEE Access, 2019
17. "UAS – UAV," by 3GPP, A Global Initiative, November 18, 2019
18. Приложение № 1к решению ГКРЧ от 15 апреля 2019 г. № 19-49-02
19. Руководящий документ отрасли РД 45.254-20 Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний
20. Проектирование радиосетей сотовых систем связи , В.Ю. Бабков, А.В. Никитина, Г.А. Фокин , СПбГУТ 2010
21. Планирование систем мобильной связи , Г.А. Фокин, В.Ю. Бабков , СПбГУТ 2017
22. J. Sabzehali, V. K. Shah, Q. Fan, B. Choudhury, L. Liu, J. H. Reed, "Optimizing Number, Placement, and Backhaul Connectivity of Multi-UAV Networks," November 9, 2021
23. L. Ruan et al., "Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework," in China Communications
24. Rohde & Schwarz; R&S®ROMES4 Drive Test Software
25. Hufford, G. A., A. G. Longley, and W. A. Kissick (1982), A guide to the use of the ITS Irregular Terrain Model in the area prediction mode, NTIA Report
26. Hufford, G. A. (1995) The ITS Irregular Terrain Model, version 1.2.2, the Algorithm.
27. Oughton, E.J., Russell, T., Johnson, J., Yardim, C., Kusuma, J., 2020. itmlogic: The Irregular Terrain Model by Longley and Rice. Journal of Open Source Software
28. John S. Seybold *Introduction to RF propagation* John Wiley and Sons, 2005
29. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: A Computer Method - 1968", A. G. Longley and P. L. Rice, NTIA Tech. Rep
30. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980
31. Goldsmith A. Wireless Communications. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
32. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd edition. New Jersey: Prentice Hall

33. Nnadi N.C., Nnadi I.C., Nnadi C.C. Optimization of CCIR pathloss model using terrain roughness parameter. Mathematical and Software Engineering. 2017
34. Mollel M.S., Kisangiri M. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication. Computer Engineering and Intelligent Systems
35. Ramos A.R., Silva B.C., Lourenço M.S., Teixeira E.B., Velez F.J. Mapping between Average SINR and Supported Throughput in 5G New Radio Small Cell Networks.
36. Hufford G.A., Longley A.G., Kissick W.A. A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, 1982

Приложение

Приложение 1. Пример кода Matlab для генерации карты покрытия

```
% Загрузка карты местности со строениями из OSM
viewer = siteviewer("Basemap","openstreetmap",...
"Buildings","washington.osm");
tx = txsite("Name","Small cell transmitter", ...
"Latitude",38.90567183758209, ... % Ввод широты
"Longitude",-77.03989679655152, ... % Ввод долготы
"AntennaHeight",15, ... % Ввод высоты подвеса антенны
"TransmitterPower",2, ... % Мощность передатчика
"TransmitterFrequency",2.6e9); % Параметры частоты
show(tx)
rtpm = propagationModel("raytracing", ...
"Method","sbr", ...
"MaxNumReflections",10, ... % Максимально допустимое растворение
"BuildingsMaterial","concrete", ... % Материал зданий
"TerrainMaterial","concrete");
% Добавление погодных эффектов
rtWeather = rtpm + propagationModel("gas") + propagationModel("rain",
'RainRate',50);
coverage(tx,rtpm, ...
"SignalStrengths",-120:-5, ...
"MaxRange",500, ... % Максимальная дальность
"Resolution",20, ... % Высота зоны исследования
"Transparency",0.6)
```

Пример кода Matlab для генерации карты покрытия с изменениями

```
viewer = siteviewer("Basemap","openstreetmap",...
"Buildings","washington.osm");
tx = txsite("Name","Small cell transmitter", ...
"Latitude",38.90567183758209, ...
"Longitude",-77.03989679655152, ...
"AntennaHeight",15, ...
"TransmitterPower",2, ...
"TransmitterFrequency", 2.6e9);
show(tx)
rtpm = propagationModel("raytracing", ...
"Method","sbr", ...
"MaxNumReflections",10, ...
"BuildingsMaterial","concrete", ...
"TerrainMaterial","concrete");
rtWeather = rtpm + propagationModel("gas") + propagationModel("rain",
'RainRate',50);
pd_10 = coverage(tx,rtpm, ...
"SignalStrengths",-120:-5, ...
"MaxRange",500, ...
"Resolution",10, ...
"Transparency",0.6);
pd_20 = coverage(tx,rtpm, ...
"SignalStrengths",-120:-5, ...
"MaxRange",500, ...
```

```

"Resolution",20, ...
"Transparency",0.6);
p10 = table2array(pd_10.Data);
p20 = table2array(pd_20.Data);
count_total = 0;
count_threshold = 0;
d10_1 = p10(:,1);
d10_2 = p10(:,2);
d10_3 = p10(:,3);
d20_1 = p20(:,1);
d20_2 = p20(:,2);
d20_3 = p20(:,3);
for i = 1:1:length(d10_1)
for t = 1:1:length(d20_1)
if (d10_1(i) > (d20_1(t) - 0.0001)) && (d10_1(i) < (d20_1(t) + 0.0001))
if (d10_2(i) > (d20_2(t) - 0.0001)) && (d10_2(i) < (d20_2(t) + 0.0001))
count_total = count_total + 1;
if abs(abs(d20_3(t)) - abs(d10_3(i))) > 10
count_threshold = count_threshold + 1;
end
end
end
end
end
per_map = count_threshold/count_total;

```

Приложение 2. Развертывание web-сервера

Ubuntu version 20

```

ssh root@ip

apt update -y

apt install dpkg-dev build-essential gnupg2 git gcc cmake libpcre3 libpcre3-dev
zlib1g zlib1g-dev openssl libssl-dev curl unzip -y

curl -L https://nginx.org/keys/nginx_signing.key | apt-key add -

nano /etc/apt/sources.list.d/nginx.list

    deb http://nginx.org/packages/ubuntu/ focal nginx

    deb-src http://nginx.org/packages/ubuntu/ focal nginx

apt update -y

cd /usr/local/src

apt source nginx

apt build-dep nginx -y

git clone --recursive https://github.com/google/nginx\_brotli.git

cd /usr/local/src/nginx-*/

nano debian/rules

``export DEB_BUILD_MAINT_OPTIONS=hardening=+all

export DEB_CFLAGS_MAINT_APPEND=-Wp,-D_FORTIFY_SOURCE=2 -
fPIC

export DEB_LDFLAGS_MAINT_APPEND=-Wl,--as-needed -pie

DPKG_EXPORT_BUILDFLAGS = 1

include /usr/share/dpkg/buildflags.mk


PKGS = nginx nginx-dbg


BUILDDIR_nginx = $(CURDIR)/debian/build-nginx

BUILDDIR_nginx_debug = $(CURDIR)/debian/build-nginx-debug

INSTALLDIR = $(CURDIR)/debian/nginx

BASEDIR = $(CURDIR)

```

```
ifneq (,$(filter parallel=%,$(DEB_BUILD_OPTIONS)))
```

```
    NUMJOBS = $(patsubst parallel=%,%,$(filter  
parallel=%,$(DEB_BUILD_OPTIONS)))
```

```
    ifeq (${NUMJOBS}, 0)
```

```
        NUMJOBS = 1
```

```
    endif
```

```
else
```

```
    NUMJOBS = 1
```

```
endif
```

```
DO_PKGS = $(PKGS)
```

```
config.env.%:
```

```
    dh_testdir
```

```
    mkdir -p $(BUILDDIR_*)
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/auto $(BUILDDIR_*)/
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/conf $(BUILDDIR_*)/
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/configure $(BUILDDIR_*)/
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/contrib $(BUILDDIR_*)/
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/man $(BUILDDIR_*)/
```

```
    cp -Pa $(CURDIR)/src $(BUILDDIR_*)/
```

```
    touch $@
```

```
config.status.nginx: config.env.nginx
```

```
    cd $(BUILDDIR_nginx) && \
```

```
        CFLAGS="" ./configure --add-module=/usr/local/src/nginx_brotli --  
prefix=/etc/nginx --sbin-path=/usr/sbin/nginx --modules-  
path=/usr/lib/nginx/modules --conf-path=/etc/nginx/nginx.conf --error-log-  
path=/var>
```

```
    touch $@
```

config.status.nginx_debug: config.env.nginx_debug

cd \$(BUILDDIR_nginx_debug) && \

CFLAGS="" ./configure --add-module=/usr/local/src/ngx_brotli --
prefix=/etc/nginx --sbin-path=/usr/sbin/nginx --modules-
path=/usr/lib/nginx/modules --conf-path=/etc/nginx/nginx.conf --error-log-
path=/var>

touch \$@

build-arch.%: config.status.%

dh_testdir

dh_prep

\$(MAKE) -j\$(NUMJOBS) -C \$(BUILDDIR_*) build

build-arch: build-arch.nginx build-arch.nginx_debug

dh_testdir

touch \$@

build-dbg.%: install

dh_testdir

dh_strip --dbg-package=nginx-dbg

build-dbg: build-dbg.nginx

dh_testdir

touch \$@

build-indep:

dh_testdir

touch \$@

build: build-arch build-indep

dh_testdir

touch \$@

clean:

dh_testdir

dh_testroot

dh_clean

rm -f \$(CURDIR)/objs

rm -rf \$(CURDIR)/debian/build-*

rm -f \$(CURDIR)/debian/*.init

find \$(CURDIR) -maxdepth 1 -size 0 -delete

post-build:

mv \$(BUILDDIR_nginx_debug)/objs/nginx
\$(BUILDDIR_nginx_debug)/objs/nginx-debug

ln -s \$(BUILDDIR_nginx)/objs \$(CURDIR)/objs

cp \$(BUILDDIR_nginx)/objs/nginx.8 \$(BUILDDIR_nginx)/objs/nginx-
debug.8

install:

dh_testdir

dh_testroot

dh_prep

dh_installdirs

dh_install

mkdir -p \$(INSTALLDIR)/usr/lib/nginx/modules

mkdir -p \$(INSTALLDIR)/usr/share/doc/nginx

```

install -m 644 debian/CHANGES
$(INSTALLDIR)/usr/share/doc/nginx/changelog

install -m 644 debian/nginx.default.conf
$(INSTALLDIR)/etc/nginx/conf.d/default.conf

ln -s /usr/lib/nginx/modules $(INSTALLDIR)/etc/nginx/modules

```

binary-indep: build post-build install

```

dh_testdir

dh_testroot

dh_installman -i -pnginx

dh_installdebconf

sed -e 's/%%PROVIDES%%/nginx/g' \
    -e 's/%%DEFAULTSTART%%/2 3 4 5/g' \
    -e 's/%%DEFAULTSTOP%%/0 1 6/g' \
    < debian/nginx.init.in > debian/nginx.init

dh_installinit -i -pnginx --no-stop-on-upgrade --no-start --name=nginx

dh_installsystemd -i -pnginx --name=nginx nginx.service

sed -e 's/%%PROVIDES%%/nginx-debug/g' \
    -e 's/%%DEFAULTSTART%%//g' \
    -e 's/%%DEFAULTSTOP%%/0 1 2 3 4 5 6/g' \
    < debian/nginx.init.in > debian/nginx-debug.init

dh_installinit -i -pnginx --no-stop-on-upgrade --no-start --noscripts --
name=nginx-debug

dh_installsystemd -i -pnginx --name=nginx-debug --no-enable nginx-
debug.service

dh_installlogrotate -i -pnginx --name=nginx

```

binary-arch: install build-dbg

```

dh_testdir

dh_testroot

```

```
dh_installchangelogs -a
dh_installdocs -a
dh_lintian -a
dh_link -aA
dh_compress -a
dh_perl -a
dh_fixperms -a
dh_installdeb -a
dh_shlibdeps -a
dh_gencontrol -a
dh_md5sums -a
dh_builddeb $(foreach p,$(DO_PKGS),-p$(p))
```

binary: binary-indep binary-arch

.PHONY: build clean binary-indep binary-arch binary install

...

```
dpkg-buildpackage -b -uc -us
```

```
ls /usr/local/src/*.deb
```

```
dpkg -i /usr/local/src/*.deb
```

```
nano /etc/nginx/nginx.conf
```

```
/// user www-data;
worker_processes auto;
pid /var/run/nginx.pid;
```

```
events {
    worker_connections 768;
}
```

```

include /etc/nginx/sites-enabled/*.stream;

http {

    # Basic

    sendfile on;
    tcp_nopush on;
    tcp_nodelay on;
    types_hash_max_size 2048;
    server_tokens off;
    ignore_invalid_headers on;

    # Decrease default timeouts to drop slow clients

    keepalive_timeout 40s;
    send_timeout 20s;
    client_header_timeout 20s;
    client_body_timeout 20s;
    reset_timedout_connection on;

    # Hash sizes

    server_names_hash_bucket_size 64;

    # Mime types

    default_type application/octet-stream;
    include /etc/nginx/mime.types;

    # Logs

    log_format main '$remote_addr - $remote_user [$time_local] "$request" $status
    $bytes_sent "$http_referer" "$http_user_agent" "$gzip_ratio";
    access_log /var/log/nginx/access.log main;
    error_log /var/log/nginx/error.log warn;

    # Limits

    limit_req_zone $binary_remote_addr zone=dos_attack:20m rate=30r/m;

    # Gzip

    gzip on;

```

```
gzip_disable "msie6";
gzip_vary off;
gzip_proxied any;
gzip_comp_level 5;
gzip_min_length 1000;
gzip_buffers 16 8k;
gzip_http_version 1.1;
gzip_types
    application/atom+xml
    application/javascript
    application/json
    application/ld+json
    application/manifest+json
    application/rss+xml
    application/vnd.geo+json
    application/vnd.ms-fontobject
    application/x-font-ttf
    application/x-web-app-manifest+json
    application/xhtml+xml
    application/xml
    font/opentype
    image/bmp
    image/svg+xml
    image/x-icon
    text/cache-manifest
    text/css
    text/plain
    text/vcard
    text/vnd.rim.location.xloc
    text/vtt
    text/x-component
    text/x-cross-domain-policy;
```

Brotli

```
brotli on;
brotli_comp_level 6;
brotli_types
    text/xml
    image/svg+xml
    application/x-font-ttf
    image/vnd.microsoft.icon
    application/x-font-opentype
    application/json
```

```
font/eot
application/vnd.ms-fontobject
application/javascript
font/otf
application/xml
application/xhtml+xml
text/javascript
application/x-javascript
text/$;
```

```
# Virtual Hosts
```

```
include /etc/nginx/sites-enabled/*;
```

```
# Configs
```

```
include /etc/nginx/conf.d/*.conf;
include /usr/share/nginx/modules/*.conf;
```

```
}
```

```
nginx -t
```

```
systemctl start nginx
```

```
systemctl status nginx
```

```
mkdir /etc/systemd/system/nginx.service.d
```

```
printf "[Service]\nExecStartPost=/bin/sleep 0.1\n" >
/etc/systemd/system/nginx.service.d/override.conf
```

```
systemctl daemon-reload
```

```
systemctl restart nginx
```

```
curl -H 'Accept-Encoding: br' -I http://localhost
```

```
apt install ufw
```

```
nano /etc/ufw/applications.d/nginx.ini
```

```
[Nginx HTTP]
title=Web Server
description=Enable NGINX HTTP traffic
ports=80/tcp
```

```
[Nginx HTTPS] \
```

```
title=Web Server (HTTPS) \  
description=Enable NGINX HTTPS traffic  
ports=443/tcp
```

```
[Nginx Full]  
title=Web Server (HTTP,HTTPS)  
description=Enable NGINX HTTP and HTTPS traffic  
ports=80,443/tcp
```

```
ufw app list
```

```
ufw enable
```

```
ufw allow 'Nginx Full'
```

```
ufw allow 'OpenSSH'
```

```
ufw status
```

```
mkdir -p /var/www/example.com/html
```

```
nano /var/www/example.com/html/index.html
```

```
<!DOCTYPE html>
```

```
<html lang="ru">
```

```
<head>
```

```
    <title>Любой веб</title>
```

```
    <meta charset="utf-8">
```

```
</head>
```

```
<body>
```

```
    <h1>Любой веб</h1>
```

```
</body>
```

```
</html>
```

```
mkdir -p /etc/nginx/sites-available/
```

```
mkdir -p /etc/nginx/sites-enabled/
```

```
nano /etc/nginx/sites-available/example.com.conf
```

```
server {  
    listen 80;
```

```
listen [::]:80;

server_name example.com www.example.com;
root /var/www/example.com/html;
index index.html index.xml;
}

ln -s /etc/nginx/sites-available/example.com.conf /etc/nginx/sites-enabled/
nginx -t
systemctl restart nginx
curl example.com
```

Приложение 3. Git-hub репозиторий с версией модели Лонгли-Райса

<https://github.com/edwardoughton/itmlogic>

Приложение 4. Git-hub репозиторий с описанием запуска и установки веб-сервера

<https://github.com/Zarano/KozlovServer/tree/> НастройкаСервера