

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО»

На правах рукописи



Адёркина Анастасия Александровна

**Разработка и исследование алгоритмов радиопланирования беспроводных
сетей в метрополитене**

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Фитасов Евгений Сергеевич

Нижний Новгород, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА ДИАПАЗОНА 5 ГГЦ В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	14
1.1 Принципы построения беспроводных сетей в тоннелях метрополитена.....	14
1.2 Выбор метода расчета затухания радиоволн в тоннелях метрополитена.....	19
1.3 Модель среды распространения	22
1.4 Анализ модели затухания.....	24
1.4.1 Общие допущения.....	24
1.4.2 Трассировка лучей	30
1.4.3 Расчет величины затухания.....	32
1.4.4 Модель стены тоннеля.....	37
1.4.5 Расчет затухания сигнала при отражении	39
1.4.6 Результирующая модель затухания.....	41
1.5 Экспериментальное исследование характеристик стен тоннелей	43
1.6 Экспериментальное исследование затухания сигнала	51
1.6.1 Исследование затухания сигнала в тоннелях.....	51
1.6.2 Исследование затухания сигнала на наземных участках.....	57
1.6.3 Исследование затухания сигнала на станциях.....	60
1.7 Дополнительные сценарии в модели затухания	64
1.8 Развитие модели	67
1.9 Выводы по главе 1	70
ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ РАССТАНОВКИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ И АНАЛИЗА ТРАФИКА ОРГАНИЗОВАННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ	73
2.1 Вводные замечания	73
2.2 Общие предположения радиопланирования	75
2.3 Алгоритм расстановки базовых станций вдоль линий метрополитена.....	76
2.3.1 Общие положения	76

2.3.2 Первичная расстановка.....	81
2.3.3 Оптимизация координат БС.....	87
2.4 Симулятор беспроводного трафика канала «поезд – базовая станция».....	93
2.4.1 Назначение симулятора.....	93
2.4.2 Модель движения поездов.....	94
2.4.3 Симулятор для одного поезда.....	97
2.4.4 Симулятор для ансамбля поездов.....	103
2.4.5 Особенности моделирования различных типов участков.....	107
2.4.6 Характеристики нагрузки БС.....	111
2.5 Выводы по главе 2.....	113
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАДИОПЛАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	
3.1 Вводные замечания.....	115
3.2 Выбор алгоритма машинного обучения для предсказания величины потерь мощности сигнала.....	116
3.3 Формирование данных для обучения и применения методов машинного обучения.....	119
3.4 Выбор метода для предсказания PL.....	123
3.5 Применение разработанного автоматизированного алгоритма радиопланирования на участках метрополитена разного типа.....	127
3.6 Анализ сокращения времени выполнения радиопланирования при использовании автоматизированного алгоритма предсказания PL.....	129
3.7 Влияние количества используемых метрик на точность предсказания величины PL.....	135
3.8 Выводы по главе 3.....	138
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ ПРИ РАДИОПЛАНИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ НА ЛИНИЯХ МЕТРО.....	
4.1 Предположения при проведении анализа.....	139

4.2 Пример применения разработанных алгоритмов для анализа существующей сети БС на подземной линии.....	141
4.3 Пример применения разработанных алгоритмов при проектировании сети БС на подземной линии	152
4.4 Пример анализа сети БС на открытой линии	156
4.5 Выводы по главе 4.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	167
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ	188

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Развитие технологий цифровой связи приводит к использованию все большего числа беспроводных сетей различного назначения. Построение сетей высокоскоростного беспроводного доступа для метрополитенов является актуальной и технически сложной задачей. Это связано с особенностью среды распространения волн – узких протяженных тоннелей сложной геометрии.

Для организации беспроводной сети в метрополитене используют сети типа «поезд – земля» диапазона 5–6 ГГц, которые состоят из стационарно расположенных вдоль маршрута поезда базовых станций (БС) и мобильных станций (МС), размещенных на крыше двух конечных (головных) вагонов поезда.

Одной из основных задач при проектировании сетей данного типа является выбор координат БС вдоль тоннеля метрополитена. Далее будем называть данную задачу радиопланированием.

Критериями выбора координат БС вдоль линий метрополитена являются:

- минимизация средней плотности БС, и как следствие, стоимости развертывания и эксплуатации сети;
- выполнение требований на уровень потерь мощности принимаемого сигнала на МС, который не должен превышать заданного порога при любом расположении МС в тоннеле.

Расстановка БС по перечисленным критериям далее в тексте будет называться оптимальной расстановкой.

До настоящего времени при проектировании сетей в метрополитене для определения координат расположения БС в тоннелях использовали, как правило, рекомендации производителей оборудования БС. Данные рекомендации задавали максимальное расстояние между БС с учетом обеспечения требуемого уровня сигнала. При этом, для прямых участков тоннелей использовали результаты измерений в открытом пространстве, а на изогнутых участках – либо проводили экспериментальные измерения для определения положения БС, либо использовали

рекомендации для прямых участков с эмпирическим коэффициентом уплотнения БС. Как показывает практика, существующий подход неэффективен в условиях тоннелей, так как не учитывает особенности распространения сигнала: сложную геометрию тоннелей с большим количеством поворотов, спусков и подъемов, присутствие множества элементов – рассеивателей электромагнитных волн.

Известны алгоритмы и методы выбора координат БС, обеспечивающие требуемый уровень сигнала при любом положении МС между БС, для открытых наземных участков или помещений. Однако, характер распространения сигнала в тоннелях существенно отличается от приведенных выше примеров.

Таким образом, для решения задачи радиопланирования необходима разработка модели распространения сигнала в тоннеле метрополитена с учетом величины потерь мощности сигнала (PL – path loss) при его распространении от точки передатчика до точки приемника.

Кроме того, на итоговый уровень покрытия линий метрополитена беспроводной сетью и на качество развернутой сети влияют ряд дополнительных эффектов, которые, как правило, проявляются в процессе эксплуатации беспроводной сети и их учет в модели распространения является сложной задачей. В настоящее время для оценки и анализа качества развернутых беспроводных сетей используют тесты в реальном времени. Но трудоёмкость и стоимость таких тестов достаточно высока и не всегда существует возможность их проводить. Альтернативным вариантом является использование симуляторов, моделирующих поведение беспроводного канала связи в процессе движения, учитывающих различные факторы, влияющие на итоговое качество сети: алгоритм хэндовер, разделение трафика, экранирование и т.д.

Существующие симуляторы беспроводного трафика, либо требуют знания характеристик уровней выше физического беспроводного протокола передачи данных, которые не рассматриваются в данной диссертационной работе, либо направлены на оптимизацию параметров движения поездов, что не является целью исследования. Таким образом, разработка симулятора для анализа качества

беспроводной сети в метрополитене в процессе радиопланирования является актуальной задачей.

Очевидно, процесс радиопланирования на основе сложной модели распространения сигнала в тоннелях метрополитена, алгоритма расстановки БС, а также симулятора, моделирующего беспроводной канал связи в процессе движения, может иметь высокую вычислительную сложность, и, следовательно, требовать значительных вычислительных ресурсов или времени обработки. Для снижения времени обработки современным подходом является использование методов машинного обучения (ML – Machine Learning). Результаты современных исследований показывают, что применение методов ML обеспечивает высокую точность при планировании беспроводных сетей в городских условиях и позволяют существенно сократить время вычисления. Используемые методы обучаются на наборе данных, полученных экспериментально или при помощи моделирования. Алгоритмов предсказания PL для сигнала диапазона 5–6 ГГц в метрополитене, основанных на методах ML и обученных на данных, полученных с помощью специальной разработанной модели распространения, в настоящее время не существует.

Таким образом, радиопланирование беспроводных сетей «поезд - земля» в тоннелях метрополитена с учетом модели распространения сигнала, алгоритма оптимизации расстановки БС и симулятора трафика в беспроводном канале связи в процессе движения является **актуальной задачей**.

В основе решений указанных задач лежат теоретические и прикладные исследования Бреховских Л.М., Басса Ф.Г., Петрова Б.М., Седякина Н.М., Уфимцева П.Я., Финкельштейна М.И., Борна М., Ландсберга Г., Dai L., Guan K., Hrovat A., Wang C.-X., Zhag Y., Binzer T., Chichon D., Alvizu R.

Целью исследования является разработка алгоритмов радиопланирования беспроводных сетей типа «поезд – земля» диапазона 5–6 ГГц в метрополитене.

Задачи исследования:

1) Разработать математическую модель затухания сигнала 5–6 ГГц для расчета уровня затухания сигнала при распространении между двумя точками в

тоннелях и на открытых участках метрополитена. Провести экспериментальные исследования для верификации разработанной модели.

2) Разработать алгоритм расстановки БС и симулятор, моделирующий беспроводной трафик в канале «поезд – базовая станция», для определения минимально необходимого количества БС и их расположения вдоль исследуемого участка для построения беспроводной сети требуемого уровня покрытия.

3) Разработать алгоритм предсказания потерь мощности сигнала на основе методов машинного обучения для снижения времени исполнения алгоритмов радиопланирования: алгоритма расстановки БС и симулятора беспроводного трафика.

Объектом исследования являются беспроводные сети типа «поезд – земля» диапазона 5–6 ГГц в метрополитене.

Предметом исследования является комплекс алгоритмов, состоящий из математической модели распространения сигнала 5–6 ГГц в метрополитене, алгоритма определения расположения минимально необходимого количества базовых станций, симулятора беспроводного трафика в канале «поезд – базовая станция», алгоритма предсказания падения мощности сигнала на основе методов машинного обучения.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы теории распространения радиоволн, электродинамики, численное (компьютерное) моделирование физических процессов, цифровой обработки сигналов, машинного обучения, методы радиофизических измерений.

Научная новизна

1. Впервые предложена и обоснована математическая модель затухания радиосигнала диапазона 5–6 ГГц в тоннелях метрополитена, основанная на методах геометрической оптики. В отличие от существующих моделей, предложенная модель учитывает сложную геометрию тоннелей метрополитена и включает параметры, полученные при экспериментальном исследовании характеристик сигнала указанного диапазона в тоннелях метрополитена.

2. Разработан комплекс алгоритмов для определения оптимальной расстановки БС на линиях метрополитена, обеспечивающий непрерывное покрытие линий радиосетью при использовании минимально необходимого количества БС. Разработанный комплекс состоит из итеративного алгоритма определения координат БС и симулятора беспроводного трафика для корректировки расположения БС и формирования итоговой расстановки.

3. Разработан автоматизированный алгоритм на основе машинного обучения, который предсказывает величину PL между произвольными точками БС и МС по геометрическим параметрам области распространения. Использование разработанного автоматизированного алгоритма позволяет существенно сократить время определения оптимальной расстановки БС.

Практическая ценность работы

1. Разработанный комплекс алгоритмов для расстановки БС сократил минимально необходимое количество БС на величину до 30% (в среднем 12%) относительно количества БС в расстановке, выполненной существующими методами, при сохранении непрерывного покрытия линий беспроводной сетью.

2. Разработанный автоматизированный алгоритм позволил в среднем в 7 раз снизить время расчета задачи радиопланирования.

Внедрение результатов работы

Разработанные алгоритмы были внедрены компанией ООО «Радио Гигабит» и применены при радиопланировании беспроводных сетей.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в учебную и научно-исследовательскую работу на кафедре радиотехники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Достоверность и обоснованность результатов

Обоснованность теоретических положений диссертационного исследования основывается на использовании классических методов теории распространения радиоволн, методах радиофизических измерений, цифровой обработки сигналов. Также, проведенные в работе исследования базируются на методах математического моделирования и натурных экспериментах.

Достоверность результатов обеспечена экспериментальной проверкой с использованием высокотехнологичной аппаратуры и подтверждена сопоставлением результатов математического моделирования с натурными испытаниями.

Результаты согласуются с современными научными представлениями и данными, полученными при обзоре отечественных и зарубежных источников. Полученные в работе результаты подтверждаются обсуждением в публикациях в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК.

Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, включая международные.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная и экспериментально исследованная модель затухания сигнала в тоннелях и на открытых участках метрополитена, основанная на методе геометрической оптики, позволяет с достаточной точностью (с отклонением в среднем 5 дБ относительно экспериментально измеренных значений) предсказывать уровень потерь мощности сигнала между двумя точками при распространении сигнала диапазона 5–6 ГГц между ними.

2. Предложенный алгоритм расстановки базовых станций в комплексе с разработанным симулятором беспроводного трафика канала «поезд – базовая станция» предлагают расстановку базовых станций, которая обеспечивает равномерное и бесперебойное покрытие участков метрополитена радиосетью при использовании до 30% меньшего количества БС (в среднем количество БС уменьшается на 12%), чем при использовании существующих методов без разработанного комплекса алгоритмов.

3. Разработанный автоматизированный алгоритм радиопланирования с использованием методов машинного обучения позволяет существенно снизить (в среднем в 7 раз) время выполнения алгоритма расстановки и симулятора трафика за счет сокращения времени расчета величин потерь мощности сигнала.

Апробация результатов

Основные положения, выводы и результаты исследования были представлены и обсуждены на научных конференциях: XXI научная конференция по радиофизике, ННГУ, Н. Новгород, 2017 г.; 73-й Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2018), Москва, 2018; XXII научная конференция по радиофизике, посвященная 100-летию Нижегородской радиолaborатории, ННГУ, Н. Новгород, 2018 г.; XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), Н. Новгород, 2018; 13-я международная научная конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (ПТСПИ-2019), Владимир, 2019; 74-й Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио, Санкт-Петербург, 2019; XXV научная конференция по радиофизике, ННГУ, Н. Новгород, 2021 г.; XXVI научная конференция по радиофизике, посвященная 120-летию М.Т. Греховой, ННГУ, Н. Новгород, 2022 г..

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 статьи – в журналах, рецензируемых ВАК РФ (включают специальность 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникации (технические науки)), одна из которых в издании, включенном в реферативную базу данных Scopus, оформлена государственная регистрация программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

Основные теоретические результаты, выводы и заключения получены автором в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского. Основные экспериментальные исследования проведены автором в ООО «Радио Гигабит».

Автор провел компьютерное моделирование и анализ методов расчета затухания сигнала, разработал используемую в диссертационном исследовании модель распространения сигнала. Соискатель лично разработал алгоритмы расстановки базовых станций, симулятор беспроводного трафика и

автоматизированный алгоритм радиопланирования с использованием методов машинного обучения. Соискателем лично были выполнены работы по выполнению радиопланирования на ряде участков метрополитенов с использованием разработанного комплекса алгоритмов.

Автор диссертации в составе коллектива инженеров ООО «Радио Гигабит» принимал участие в экспериментальных измерениях характеристик радиосигнала при распространении на различных участках метрополитена. Измерения проводились в Московском метрополитене.

Соответствие специальности

Содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 4 и 19 паспорта специальности 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 188 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 151 источник. Диссертационная работа иллюстрирована 76 рисунками и 19 таблицами, содержит 35 формул, приложение с актами о внедрении результатов диссертационного исследования и государственной регистрацией программы для ЭВМ.

Диссертация подготовлена в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (ННГУ).

Основные результаты, приведенные в главе 3 данной диссертации, получены в ходе работ по гранту Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (№ 16184ГУ/2020) в рамках выполнения проекта «Разработка методов машинного обучения при определении оптимального количества и расположения базовых станций для обеспечения непрерывного покрытия тоннелей общественного транспорта радиосетью.

Автор также выражает благодарность коллективу кафедры радиотехники радиофизического факультета ННГУ и научному руководителю – заведующему кафедрой радиотехники д.т.н, доц. Фитасову Евгению Сергеевичу. Автор выражает глубокую благодарность профессору кафедры радиотехники радиофизического

факультета, лауреату премии Правительства РФ в области науки и техники, д.т.н. проф. Орлову Игорю Яковлевичу, участвовавшему в обсуждении положений, задач и экспериментальных результатов диссертации. Диссертант благодарен доценту кафедры радиотехники к.ф.-м.н. Пархачёву Владимиру Владимировичу за обсуждение ряда вопросов и полезные рекомендации.

Автор диссертации выражает благодарность коллективу компании ООО «Радио Гигабит»: генеральному директору к.ф.-м.н. Масленникову Роману Олеговичу, Трушанину Алексею Юрьевичу, Шашанову Михаилу Александровичу, Шумилову Вячеславу Юрьевичу, Кулакову Денису Александровичу.

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА ДИАПАЗОНА 5 ГГц В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

В первой главе приведены: обоснование необходимости разработки модели затухания сигнала диапазона 5–6 ГГц при распространении вдоль линий метрополитена, результаты анализа существующих подходов для построения модели затухания радиосигнала указанного диапазона. Результатом анализа является выбор метода для построения модели затухания. Также в главе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик для верификации разработанной модели.

Основные результаты, представленные в первой главе, опубликованы в статьях [9, 3, 5] и были представлены на следующих конференциях [6, 7, 9, 10, 11, 12].

1.1 Принципы построения беспроводных сетей в тоннелях метрополитена

Беспроводная связь играет большую роль в организации повседневной жизни людей, в том числе увеличении уровня безопасности и комфорта [35, 53, 88]. Для повышения эффективности и комфорта метрополитена были развёрнуты беспроводные сети внутри тоннелей и на открытых участках метрополитена [23, 27, 48, 53, 149].

Построение сетей высокоскоростного беспроводного доступа для метрополитенов является актуальной и технически сложной задачей [23, 27]. Это связано с большой концентрацией абонентов и особенностью среды распространения волн – узких протяженных тоннелей, часто сложной геометрии [53].

До 2011 года для покрытия тоннелей метрополитена беспроводной сетью использовали излучающий кабель [23, 53]. Но использование излучающего кабеля имеет ряд существенных ограничений. Первое ограничение – это диапазон частот,

позволяющий использовать эту технологию. Излучающий кабель работает с частотами 75–2700 МГц, что не подходит под выбранный диапазон 5–6 ГГц для сетей Wi-Fi [13]. Второе ограничение – технология позволяет прокладывать кабель только на участках с простой геометрией (малые уклоны по вертикали, длинные прямые участки по горизонтали) [23]. В соответствии с данными ограничениями, технология излучающего кабеля подходит для большей части линий Москвы, но совершенно не подходит для метро Санкт-Петербурга. Следовательно, излучающий кабель не является универсальным решением. Третье ограничение – низкая надежность кабеля. При повреждении кабеля на любом участке работа всей сети нарушается. В соответствии с перечисленными недостатками технология излучающего кабеля не подходит для развертывания надежной высокоскоростной сети беспроводного доступа к сети Интернет [16, 45].

В качестве современной альтернативы излучающего кабеля используется сеть БС, размещенный вдоль линий метрополитена. При таком подходе образуется радиоканал между базовыми станциями в тоннеле и головными вагонами поезда [27]. К базовым станциям протянут оптический кабель, что является более экономически выгодным и практически простым решением, чем использование излучающего кабеля [42].

При организации сетей с помощью БС, внутри каждого пассажирского вагона устанавливается точка доступа выбранного поколения (это могут быть точки доступа Wi-Fi, пико соты мобильной связи 4G и 5G), которые подключаются к бортовой сети поезда [48]. Для связи бортовой сети со стационарной опорной сетью и далее с сетью Интернет используются специализированные системы связи типа «поезд – земля» [149].

Для образования беспроводного соединения «поезд – земля» используется диапазон 5–6 ГГц. Радиоканал «поезд – земля» работает в том же частотном диапазоне, что и Wi-Fi с разрешенным частотным спектром 5150–5350 МГц. Используемое оборудование использует чипы Wi-Fi, соответствующие стандарту 802.11n, при этом данные передаются по проприетарному протоколу, который формируется дополнительной микросхемой [149].

Сети типа «поезд – земля» состоят из стационарно расположенных вдоль маршрута поезда БС и МС, размещенных на крыше двух конечных (головных) вагонов поезда. Более подробно архитектура сети рассмотрена в [149]. Процедура построения описанной сети приведена на примере метрополитена Москвы [48], [149]. Упрощенная архитектура сети, приведённой выше, схематично представлена на рисунке 1. Данная схема является универсальной для метрополитена и может быть развернута на участке любого типа.

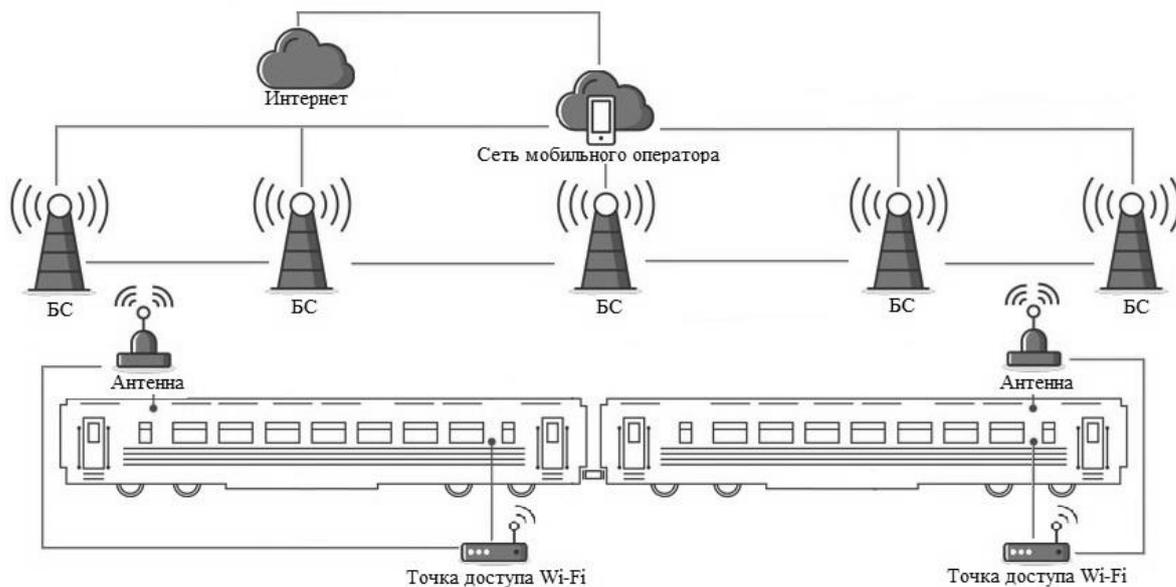


Рисунок 1 – Архитектура беспроводной сети на линиях метрополитена

Радиопланирование — это комплекс мероприятий по выбору оптимальной конфигурации беспроводной сети, заключающейся в выборе мест установок точек доступа [43]. Решение вопроса частотного планирования, которое также является частью радиопланирования, в диссертационной работе не приводится. Используемые частоты считаем известными и фиксированными.

Любой подход к решению задачи радиопланирования базируется на модели распространения сигнала исследуемого диапазона. Модель распространения сигнала необходима для расчета величины потери мощности сигнала (PL – path loss) при его распространении от точки передатчика до точки приемника. Рассмотрев различные подходы к построению модели затухания сигнала диапазона 5–6 ГГц при распространении в тоннелях метрополитена [21, 22, 58, 59, 143], стало

очевидно, что традиционные методы не применимы, так как не могут описать изменение PL при распространении в тоннелях, и следовательно, не могут быть использованы при решении задачи нахождения оптимальной расстановки БС в метрополитене.

Традиционные модели распространения не учитывают особенности распространения радиосигнала в тоннелях, что является необходимым при изучении характеристик радиосигнал, а тоннели метрополитена имеют сложную геометрию с большим количеством поворотов, спусков и подъемов [12]. Также в тоннелях располагается множество элементов инфраструктуры – рассеивателей электромагнитных волн, что препятствует распространению сигнала, вносит в него дополнительные искажения и приводит к потере передаваемой мощности [24].

Был проведен анализ известных методов электродинамики [17, 76, 99, 120, 140] для учета изменения характеристик сигнала при распространении в тоннелях сложной геометрии. Основное внимание было уделено моделям распространения сигнала вдоль различных тоннелей [64, 79, 112, 123], в том числе, в железнодорожных тоннелях [147] и подземных шахтах [129]. Существующие методы рассматривают радиосигнал в зависимости от его частоты, размеров пространства распространения [33, 60, 76, 145] и позволяют с различной точностью рассчитать PL сигнала при его распространении [15, 24, 45, 96, 140].

При этом, для решения поставленной задачи для сигнала диапазона 5–6 ГГц требуется метод, позволяющий достаточно точно описывать поведение PL сигнала при распространении в тоннелях и обладающий относительно небольшим временем вычисления [64, 67, 77, 130, 144]. Таким образом, задача разработки модели затухания радиосигнала в тоннелях метрополитена является актуальной.

При исследовании методов построения модели затухания сигнала возникнет необходимость в представлении области распространения с помощью некоторых количественных характеристик. Как было сказано выше, поверхность стен тоннеля покрыта множеством рассеивателей, которые вносят дополнительный вклад в затухание сигнала при распространении, следовательно, при построении модели необходимо учитывать параметры стен тоннелей. Так, например, в статье [99],

помимо обзора различных методов построения модели затухания сигнала в тоннелях, рассматривается вопрос необходимости учета электромагнитных характеристик стен тоннеля при построении точной модели. Для учета особенностей среды распространения радиосигнала проводятся экспериментальные измерения характеристик сигнала [72, 79, 86, 93, 108].

Точность модели затухания сигнала играет критическую роль при проектировании и оценке коммуникационных систем [33, 76, 96]. Для метрополитена можно выделить следующие основные сценарии распространения: тоннели, открытые участки, станции. Каждый из этих участков имеет свои особенности, которые оказывают влияние на скорость спада мощности сигнала при распространении.

Измерениями затухания сигнала в тоннелях ранее занимались многие исследовательские группы [104]. Труды [68, 81] являются одними из самых ранних работ, посвященных проведению измерений свойств радиоканала в железнодорожных тоннелях. Изучению характеристик беспроводного канала именно в тоннелях метрополитена посвящено большое количество работ, в том числе [67, 77, 87, 97]. Методика проведения измерений является универсальной, но результаты, полученные другими исследовательскими группами, использовать нельзя, так как было использовано другое приемо-передающее оборудование, другие частотные диапазоны.

Таким образом, при разработке модели затухания необходимым этапом является сравнение результатов, рассчитанных с помощью разработанной модели, с результатами измерений в реальных условиях. Также в некоторых случаях необходимым является измерение некоторых параметров моделей, например, характеризующих электромагнитные свойства стен, и включение их в разрабатываемую модель для повышения ее точности. Таким образом, проведение уникальных измерений характеристик стен тоннелей в метрополитене является актуальной задачей для построения достаточно точной модели затухания.

1.2 Выбор метода расчета затухания радиоволн в тоннелях метрополитена

Задачей разрабатываемой модели затухания радиосигнала является максимально точное предсказание падения мощности сигнала при его распространении вдоль путей метро. Основное внимание уделено моделям распространения сигнала вдоль тоннелей [64, 79, 112, 123]. Предполагается, что модель должна быть универсальной для расчета затухания сигналов с частотами в диапазоне 5–6 ГГц. Точная калибровка модели и выбор ее параметров выполняются для частоты 5 ГГц.

При выборе метода расчета затухания сигнала был проведен анализ следующих основных методов, известных из литературы по прикладной электродинамике [17, 20, 45, 76, 99, 140]:

1. Непосредственное численное решение уравнений в частных производных (волнового или уравнений Максвелла) с граничными условиями на заданных сетках в пространстве и времени [24, 33, 40, 76, 140];
2. Аналитический расчет распространения волн с заменой границ (стен тоннеля) некоторыми каноническими формами (по аналогии с описанием распространения волны в прямоугольных и круглых волноводах, которое хорошо известно) [33, 40];
3. Приближение геометрической оптики (ГО) [76, 91, 96, 143];
4. Приближение геометрической (однородной геометрической) теории дифракции (GTD – Geometrical theory of diffraction, UTD – Uniform geometrical theory of diffraction), которое занимает промежуточное место между аналитическим расчетом и приближением ГО [76, 101, 120, 121].

Также был проведен анализ методов, применяемых при моделировании затухания радиосигнала в железнодорожных тоннелях [129, 147].

Основной особенностью расчета затухания электромагнитных волн в тоннелях метрополитена является характерное соотношение размеров геометрических объектов, с которыми взаимодействует поле (ширина и высота

тоннеля, радиусы поворота и масштабы перепада по высоте – от единиц до сотен метров) и длины волны (6 см для 5 ГГц сигнала).

Указанное соотношение масштабов ограничивает использование первой группы методов, так как шаг пространственной сетки должен быть много меньше длины волны, а общий размер сетки должен быть таким, чтобы покрыть всю область распространения сигнала. Например, при средних значениях ширины и высоты тоннеля прямоугольного сечения равных 5 метров и расстоянии между БС и МС равном 10 метров, для построения пространства расчета при шаге сетки равном длине волны, необходимо минимум 10^{10} точек. Для точных расчетов это значение должно быть увеличено в несколько раз. Приведенное для примера расстояние в 10 метров является небольшим, расстояния между МС и БС, для которых необходимо рассчитать поведение характеристик сигнала часто составляет сотни метров. Таким образом, характерные для первой группы методов, условия приводят к необходимости расчета огромных сеток, что практически нереализуемо.

Вторая группа методов также оказывается практически неприменимой, т. к. длина волны слишком мала для обеспечения возможности аппроксимации реальной формы тоннеля простыми аналогами (как это делается, например, в теории волноводов).

Приближение ГО [76], напротив, является высокочастотной асимптотикой решения волнового уравнения с заданными граничными условиями. Ошибка данного метода уменьшается по мере снижения длины волны (по сравнению с характерными объектами). В то же время известно, что использование приближения ГО приводит к появлению артефактов в отдельных областях пространства, где формальный расчет дает бесконечную или нулевую величину уровня сигнала. Бесконечная величина соответствует области каустик, которые являются огибающей семейства лучей, не сходящихся в одной точке. Нулевая величина уровня сигнала соответствует области геометрической тени [14]. Несмотря на то, что при снижении длины волны в областях каустик уровень

сигнала растет, а в областях геометрических теней падает, физическое поле никогда не может обратиться в ноль или бесконечность.

Группа методов GTD/UTD [76, 101, 120, 121] была разработана как надстройка над классическим подходом ГО, позволяющая, во-первых, повысить точность ГО расчета при больших длинах волн (но все еще достаточно малых по сравнению с размером объектов), а во-вторых, обеспечить непрерывное решение во всем пространстве (в том числе в области геометрических каустик и теней). Решения GTD/UTD являются предельными переходами строгих решений для большого ряда канонических (геометрически простых) форм, для которых такое решение известно. ГО решение, в свою очередь, является предельным случаем решений GTD/UTD при стремлении длины волны к нулю.

Рассматривая применимость методов ГО и GTD/UTD к задаче расчета затухания сигнала в тоннелях следует отметить, во-первых, довольно высокую точность предсказаний обоих методов вне окрестностей каустик и границ геометрической тени. Во-вторых, можно отметить достаточно частое возникновение каустик и границ тени в реальных тоннелях со сложной формой изгибов.

Конкретный объем областей вокруг каустик и границ тени, где отклонение реального поля от расчетного выше допустимого, зависит от длины волны. Для длин волны диапазона 10–90 ГГц эти области достаточно малы, и вероятность попадания приемника сигнала в них стремится к нулю [76, 101, 120, 121]. Для меньших же длин волн попадание приемника в области каустик и границ тени начинает наблюдаться в практических расчетах. Это может снижать точность модели для соответствующих положений передатчика и приемника. Хотя вероятность их возникновения достаточно мала, появление подобных артефактов в результатах расчета затухания в задаче радиопланирования нежелательно.

Дополнительным фактором, влияющим на выбор того или иного метода расчета затухания сигнала в тоннелях, является сложность его программной реализации и требуемый объем вычислений. При сравнении методов ГО и GTD/UTD можно отметить значительно меньшую сложность метода ГО.

На основании проведенного анализа в качестве первоначального метода к расчету затухания сигнала был выбран подход ГО [63, 70, 78, 100, 109]. В окрестностях теней и каустик применяются простые приемы для сглаживания результатов, которые позволяют снизить ошибку предсказанного затухания при случайном попадании в такие области. В качестве следующего возможного этапа развития метода радиопланирования предлагается расширение текущей модели и применение методов GTD/UTD в окрестностях каустик и геометрических теней.

1.3 Модель среды распространения

В качестве среды распространения сигнала рассматриваются открытые участки и тоннели. Предполагается, что тоннель имеет постоянную геометрию поперечного сечения и постоянные электромагнитные характеристики стен вдоль всей области расчета. Ось тоннеля в пространстве задается кривыми в двух плоскостях. Первая кривая является проекцией оси на горизонтальную плоскость и называется планом пути. Вторая кривая, называемая профилем пути, задается на вертикально расположенной поверхности, повторяющей изгибы на плане пути (план является горизонтальным сечением этой поверхности). Термины «план» и «профиль» взяты из железнодорожной терминологии [19].

Кривые плана и профиля в рамках модели затухания могут состоять из дискретного набора соединяющихся отрезков прямых и дуг окружностей некоторых радиусов, которые называются сегментами пути [19]. Кривые в целом являются непрерывными и непрерывно-дифференцируемыми (то есть в точке соединения сегменты имеют общую касательную). На рисунке 2 приведен пример плана пути для одной из линий московского метрополитена.

Двумерная геометрическая модель стен тоннеля задается в виде двух непрерывных кривых в каждой из плоскостей [19]. При горизонтальном расчете они являются сечениями боковых стен, а при вертикальном расчете – сечениями пола и потолка. Для дальнейшего анализа будем пользоваться понятиями стен и ширины тоннеля, соответствующие горизонтальному расчету. Вертикальный

расчет производится полностью аналогично с точностью до замены боковых стен полом и потолком, а ширины тоннеля – высотой тоннеля.

Стены тоннеля, как и ось, задаются непрерывными и непрерывно-дифференцируемыми кривыми, состоящими из отрезков прямых и дуг постоянного радиуса [19]. Пример схематичного отображения прямого участка и участка поворота приведена на рисунке 3.

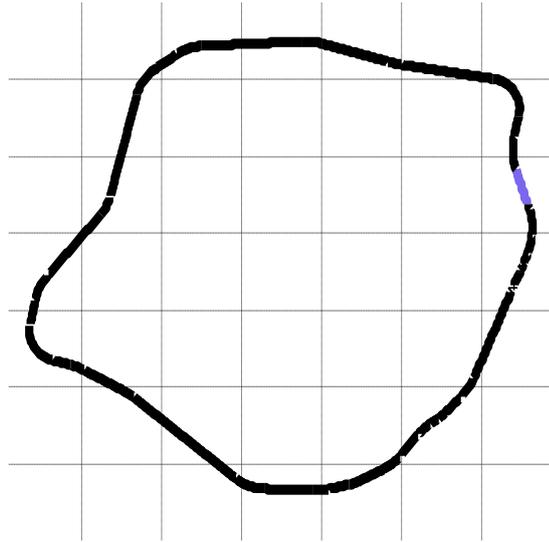


Рисунок 2 – Пример плана пути для Кольцевой линии Московского метрополитена. Кривая состоит из круговых сегментов различного радиуса и прямых сегментов

Отрезки прямых параллельны оси тоннеля и находятся на расстоянии в половину ширины тоннеля от оси влево и вправо. Ширина тоннеля на рисунке обозначена как h . Дуги стен имеют общий центр с дугой оси тоннеля. Радиус дуги на рисунке обозначен как R . Дуга внутренней стены имеет радиус меньший, чем радиус осевой дуги на половину ширины тоннеля, а дуга наружной стены – радиус, больший на половину ширины тоннеля. Соотношение радиусов стен участка тоннеля изображено на рисунке 3.

Вдоль оси тоннеля в каждой плоскости вводится криволинейная координатная ось. Координата вдоль оси тоннеля может задаваться как в метрах от некоторой условной точки, так и номером пикета со смещением. Пикетом в

железнодорожной терминологии обозначается точка разметки расстояния с шагом как правило 100 метров на железнодорожных линиях или линиях метрополитена.

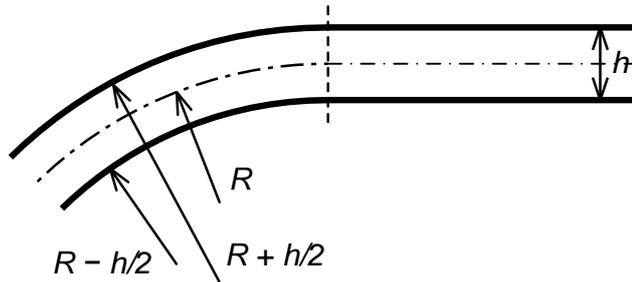


Рисунок 3 – Двумерная модель стен тоннеля

Модель тоннеля задается шириной, высотой и наборами сегментов плана и профиля [19]. Каждый из дуговых сегментов характеризуется радиусом, длиной и направлением поворота (лево-право или верх-низ). Прямой сегмент характеризуется только длиной.

При расчете затухания предполагается, что приемник и передатчик имеют фиксированные координаты в поперечном сечении тоннеля, то есть фиксированное смещение относительно оси тоннеля в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В качестве переменных параметров рассматриваются только координаты передатчика и приемника вдоль оси тоннеля (например, их координаты по пикетам).

1.4 Анализ модели затухания

1.4.1 Общие допущения

Модель затухания сигнала предполагает независимое проведение расчетов в плоскости плана и плоскости профиля с последующим комбинированием результатов для получения окончательной оценки затухания сигнала. Такой подход допустим для существенного упрощения расчетов.

Вначале рассмотрим затухание в свободном пространстве. Согласно формуле Фрииса [96], затухание между входом передающей антенны и выходом приемной

антенны в децибелах PL при их расположении в свободном пространстве вычисляется как:

$$\begin{aligned}
 PL &= 10 \cdot \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_t}{\frac{P_t}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}} \right) = \dots \\
 &= 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2 \right) = 20 \cdot \log_{10} d + 20 \cdot \log_{10} f + const,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где d – расстояние между приемной и передающей антеннами в метрах,
 f – частота сигнала в Гц.

После математических преобразований и учета коэффициентов усиления передающей и принимающей антенн, формула для расчета PL будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 PL &= 20 \lg \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - (G_{TX} + G_{RX}) = -147.55 + 20 \lg d + \\
 &20 \lg f - (G_{TX} + G_{RX}),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где G_{TX} и G_{RX} – коэффициенты усиления в направлении прямой, соединяющей две антенны в дБи.

Формула применима в дальней зоне антенн [30]. Формула (2) применима для расчета величины PL в трехмерном пространстве. При расчете PL в рамках решаемой задачи, слагаемые, отвечающие за зависимость от частоты и параметры антенн, являются постоянными. Перепишем уравнение (2) в виде, показывающем зависимость величины PL от изменяющегося параметра – расстояния:

$$PL_{3D} \sim 20 \lg d. \tag{3}$$

Для разделения расчета затухания на две плоскости можно заметить, что сферическое затухание формуле (1) можно разделить на сумму в децибелах двух

цилиндрических затуханий. Каждое из таких цилиндрических затуханий описывают круговую расходимость излучения в свободном двумерном пространстве – вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\begin{aligned}
 PL &= 10 \cdot \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_t}{\frac{P_t}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi}} \right) = \dots \\
 &= 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d \cdot 4 \cdot \pi}{\lambda^2} \right) = 10 \cdot \log_{10} d + 20 \cdot \log_{10} f + const,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где d – расстояние между приемной и передающей антеннами в метрах,
 f – частота сигнала в Гц.

Таким образом выражение (3) для плоскости будет иметь вид:

$$PL_{2D} \sim 10 \lg d. \tag{5}$$

Если предположить распространение сигнала между двумя бесконечными вертикальными плоскостями (тоннель без пола и потолка со стенами, бесконечно уходящими вверх и вниз), то из-за симметрии такой системы можно свести расчет затухания сигнала к двумерному. В этом случае затухание можно строго разделить на сумму (в децибелах) затухания в горизонтальной плоскости (модификация зависимости (5), связанная с наличием двух стен и рассчитываемая двумерно) и затухания в свободном пространстве вертикальной плоскости.

В предложенной модели затухания далее эвристически предполагается, что если провести расчет двумерного распространения сигнала в вертикальной и горизонтальной плоскостях независимо (с учетом наличия стен в обеих плоскостях расчета), а затем просуммировать полученные величины затуханий в дБ (или умножить их в разах), то можно получить достаточно точную оценку затухания при распространении сигнала вдоль тоннеля. Такое предположение является основой разработанной модели. Предлагаемый расчет затухания в двух взаимно

перпендикулярных плоскостях в рамках разрабатываемой модели будем считать справедливым для тоннелей любой формы сечения. Расчет PL может быть проведен для точек T_x – R_x , расположенных в любом месте сечения тоннеля, для этого производится построение вертикальной и горизонтальной пересекающихся плоскостей через середину линии, соединяющей точки T_x и R_x . Самыми распространенными формами сечений тоннелей являются: прямоугольная и круглая. В случае прямоугольного сечения, плоскости боковых стен и плоскости пола и потолка параллельны, следовательно, ширины проведенных плоскостей будут одинаковыми при любом расположении точек T_x и R_x . В случае тоннеля круглого сечения ширины плоскостей будут пересчитываться в зависимости от расположения точек T_x и R_x . При расположении точек в центре сечения тоннеля ширины плоскостей максимальны, при смещении точек от центра ширины уменьшаются.

Как было показано выше, предлагается проводить расчет затухания сигнала в каждой плоскости методом ГО [76, 91]. Данный подход предполагает разбиение всего излучения, исходящего из источника, на набор лучевых трубок (ограниченных прямыми, совпадающими в каждой точке с направлением распространения энергии) [76]. Иллюстрация лучевой трубки приведена на рисунке 4.

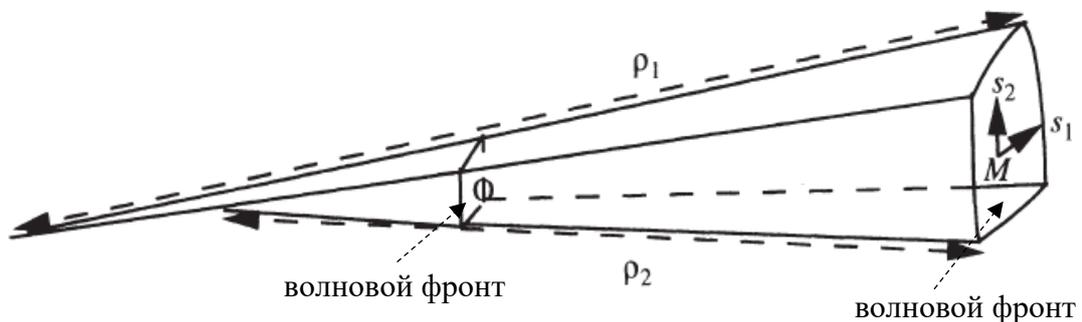


Рисунок 4 – Лучевая трубка [68]

На рисунке введены следующие обозначения: ρ_1 , ρ_2 – радиусы кривизны лучевой трубки, Φ – выбранная точка на плоскости волнового фронта, M –

выбранная точка на плоскости волнового фронта в сечении лучевой трубки с большей площадью, (s_1, s_2) – ортогональные координатные вектора в плоскости волнового фронта. Из построения следует, что полный поток излучения на всей длине трубки постоянен, а локальная плотность потока (связанная с мощностью сигнала) обратно пропорциональна локальной геометрической ширине трубки [76]. На рисунке 4 точка Φ выбрана на плоскости волнового фронта, чья нормаль совпадает с направлением распространения луча.

Определим площадь криволинейного прямоугольника со сторонами δs_1 и δs_2 , внутри которого расположена точка Φ следующим образом:

$$\delta A(O) = \delta s_1 \cdot \delta s_2. \quad (6)$$

Из-за расходимости лучевой трубки площадь криволинейного прямоугольника увеличивается и выражение для площади прямоугольника на волновом фронте с точкой M выражается следующим образом:

$$\delta A(M) = \frac{(\rho_1 + s)}{\rho_1} \cdot \delta s_1 \cdot \frac{(\rho_2 + s)}{\rho_2} \cdot \delta s_2, \quad (7)$$

где s – криволинейная абсцисса.

Уравнение сохранения мощности в лучевой трубке имеет вид:

$$|E(M)|^2 \delta A(M) = |E(\Phi)|^2 \delta A(\Phi), \quad (8)$$

где $E(\Phi)$ и $E(M)$ напряженности электромагнитного поля в точках O и M .

Поле в точке M выражается следующим образом:

$$|E(M)| = |E(\Phi)| \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{(\rho_1 + s) \cdot (\rho_2 + s)}}. \quad (9)$$

В свободном двумерном пространстве в дальней зоне источника трубки расходятся под постоянным малым углом, толщина трубки растет линейно, а мощность сигнала падает обратно пропорционально расстоянию (9), что соответствует предыдущим выкладкам. При отражении трубки от плоской стены характер расходимости не меняется, а в затухании сигнала учитывается коэффициент отражения [91].

При отражении сигнала от искривленных (выпуклых или вогнутых) стен характер расходимости трубок дополнительно изменяется (в том числе при отражении от вогнутой стены трубка может начать сходиться) [91]. Те точки, куда не попадают выпущенные лучевые трубки, образуют геометрические тени, а те точки, где лучевые трубки смыкаются в точку (а соседние лучевые трубки там же пересекаются), образуют каустики [76]. Каустикой в оптике называется огибающая семейства лучей, не сходящихся в одной точке. Пример каустики при отражении лучевых трубок, вышедших из точки источника, от поверхности вогнутой стены приведен на рисунке 5.

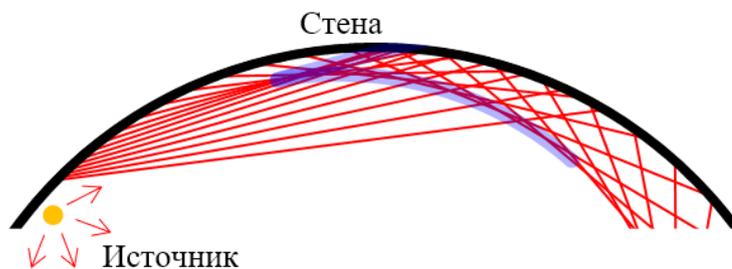


Рисунок 5 – Иллюстрация возникновения каустики при отражении от вогнутой стены

Если в точку приема сигнала приходят несколько независимых трубок, то соответствующие сигналы суммируются. В дальнейшем для простоты лучевые трубки будут иногда просто называться лучами, а поток излучения в конкретном участке трубки будет называться локальной мощностью луча (9).

Важно отметить, что лучи комбинируются по мощности, а не по комплексной амплитуде, то есть интерференция между лучами не учитывается [16, 28]. Такое

решение было принято по результатам сравнения различных вариантов реализации модели затухания с измеренными данными. Был выбран вариант, наилучшим образом совпадающий с измерениями [1, 22]. Более подробно данное упрощение будет обосновано в разделе 1.4.6.

При расчете взаимодействия исходящих лучей с передающей антенной и входящих лучей с приемной антенной учитывается форма диаграмм направленности антенн [37]. Каждый луч умножается на коэффициент усиления антенны в конкретном направлении, в котором данный луч выходит из антенны или приходит в антенну. Предполагается, что трехмерная диаграмма направленности антенны также может быть разделена на две двумерные составляющие (диаграмма в азимутальной плоскости и диаграмма в плоскости угла места), а коэффициент усиления в заданном направлении в пространстве образуется суммированием в децибелах (произведением в размах) азимутальной диаграммы и диаграммы по углу места [37, 96]. В соответствии с общей предложенной концепцией в расчетах в горизонтальной плоскости используются азимутальные диаграммы, а в расчетах в вертикальной плоскости – диаграммы по углу места.

1.4.2 Трассировка лучей

Одним из ключевых алгоритмов, реализуемых при вычислении затухания в каждой плоскости методами ГО, является геометрическая трассировка лучей [63, 70, 116, 131]. Приведенный ниже алгоритм одинаково применяется при расчете затухания как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости.

Трассировка лучей используется для того, чтобы найти все возможные геометрические лучи (бесконечно тонкие лучевые трубки), выходящие из передатчика (Tx) и входящие в приемник (Rx), при том, что они распространяются по законам ГО [63, 74, 100]. Применительно к рассмотренной выше модели среды это означает, что, пересекаясь с прямым отрезком стены, луч должен зеркально отразиться (угол падения равен углу отражения), а пересекаясь с

дугой окружности, он должен зеркально отразиться от касательной к этой окружности в текущей точке [109, 131].

Для нахождения лучей, соединяющих передающую и приемную антенны, вначале генерируется набор лучей, исходящих из передающей антенны, с равным угловым шагом в диапазоне от -90° до 90° относительно оси тоннеля. Лучи запускаются только в сторону нахождения приемника [3, 5]. Процесс генерации и распространения множества лучей схематично изображен на рисунке 6.

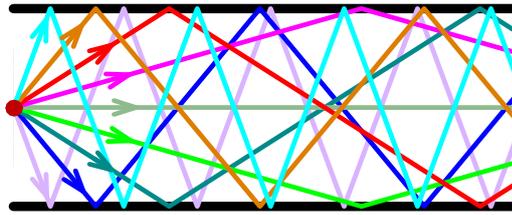


Рисунок 6 – Иллюстрация трассировки лучей в прямом тоннеле

Распространяясь в сторону приемника, исходные лучи последовательно отражаются от стен тоннеля по законам ГО до тех пор, пока не попадут в точку расположения приемной антенны [3, 63, 109, 132]. Если в процессе распространения количество отражений конкретного луча превышает некоторую заданную величину, называемую максимальным порядком отражений, то расчет величины затухания мощности для данного луча прекращается еще до достижения поперечника приемника. Максимальное количество переотражений в зависимости от расстояния между передатчиком и приемников приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры алгоритма трассировки лучей

Расстояние между Тх и Rx, м	Кол-во исходных лучей, тыс.	Максимальный порядок отражения
0–100	3	5
100–300	5	7
300–600	8	9
600–800	15	12
800–1500	25	20
>1500	40	25

Такое предположение справедливо за счет того, что при каждом отражении происходит помимо зеркального, происходит и диффузное отражение [8], так как поверхность стен тоннелей очень неоднородна. При большом количестве переотражений подавляющая часть энергии рассеивается при диффузном рассеянии и мощность сигнала, детектируемая на приемнике, будет лишком малой, а расчет такого луча вычислительно долгий за счет большого пройденного расстояния. Таким образом, расчет таких лучей можно прекратить заранее. Параметрами алгоритма трассировки являются общее число исходно запускаемых лучей и максимальный порядок отражений. Величины этих параметров определяются в зависимости от расстояния между точками расположения передающей и приемной антенн вдоль тоннеля в соответствии с таблицей. Конкретные значения параметров нами выбраны экспериментально при численном моделировании разработанной модели для обеспечения достаточной ее точности при расчете величины затухания сигнала. Обеспечиваемая точность определялась по сравнению значений PL, рассчитанных разработанной моделью с фиксированным значением количества лучей и максимального порядка переотражений, и значений, полученных при экспериментальном исследовании поведения сигнала.

При моделировании открытых участков стены могут отсутствовать, при этом алгоритм находит луч прямой видимости между передатчиком и приемником и луч, отраженные от пола.

1.4.3 Расчет величины затухания

Для каждого из пришедших в точку приема лучей в каждой из двух плоскостей расчета определяется итоговая (от точки передатчика до точки приемника) величина затухания, состоящая из следующих компонент [88]:

$$PL_k^{(h/v)} = PL_{GO} + PL_{air} + PL_{refl} - (G_{TX} + G_{RX}), \quad (10)$$

где $PL_k^{(h/v)}$ – суммарное затухание k -го луча в горизонтальной (h) или вертикальной (v) плоскости в дБ,

PL_{GO} – величина затухания мощности сигнала при распространении, возникающая из-за расходимости лучевых трубок при прохождении расстояния. Величина выражается в дБ,

PL_{air} – величина затухания мощности сигнала при распространении, возникающая из-за поглощения ЭМ излучения молекулами газов, содержащихся в воздушной среде. Величина выражается в дБ,

PL_{refl} – суммарная величина затухания мощности сигнала вследствие отражения от стен, в дБ,

G_{TX} – коэффициент усиления передающей антенны в дБи,

G_{RX} – коэффициент усиления приемной антенны в дБи.

Как было отмечено ранее, G_{TX} и G_{RX} являются величинами диаграмм направленности под углами выхода и прихода луча, причем это азимутальная диаграмма для расчета в горизонтальной плоскости и диаграмма по углу места в вертикальной плоскости [37, 127, 139].

Величина ГО затухания включает в себя изменение мощности вследствие сходимости и расходимости бесконечно тонкой лучевой трубки при прохождении определенного расстояния. В простейшем случае, если луч не испытывает ни одного отражения (луч является лучом прямой видимости), то выражение для величины PL в каждой из плоскостей пропорционально логарифму расстояния вдоль луча, выраженной в метрах, и имеет вид (4).

Такой же результат получается и в том случае, если все отражения происходят только от прямых участков стен. Длина в данном случае является длиной ломанной, состоящей из отрезков прямых: от источника до первого отражения, от каждой точки отражения до следующей точки отражения, от последней точки отражения до точки приемника.

После отражения от радиальных участков характер расходимости лучевой трубки изменяется, что меняет зависимость дальнейшего затухания от пройденного лучом пути. Для учета этого эффекта в итоге используется следующая процедура расчета PL_{GO} .

Для каждого n -го акта отражения от стен ($n > 0$) итеративно вычисляется параметр расстояния от точки отражения до каустики (условной точки, где отраженная лучевая трубка, продленная в обе стороны на достаточное расстояние, смыкается):

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{\rho_{n-1} + l_{n-1}} \pm \frac{2}{a_n \cos(\theta_n)}, \quad (11)$$

где ρ_n – параметр расстояния до каустики после n -го отражения в метрах,
 ρ_{n-1} – параметр расстояния до каустики после $n-1$ -го отражения в метрах,
 $\rho_0 = 0$,
 l_{n-1} – расстояние, пройденное лучом от $(n-1)$ -го отражения до n -го в метрах,
 l_0 – расстояние от передатчика до первой точки отражения в метрах,
 a_n – радиус отражающей стены в точке n -го отражения в метрах,
 θ_n – величина угла падения, отсчитанного от нормали в градусах.
 Знак «+» соответствует выпуклой стене, знак «-» – вогнутой.

Расстояние до каустики имеет положительный знак в том случае, если лучи после отражения расходятся (точка каустики остается сзади от точки отражения), и отрицательный знак, если лучи после отражения сходятся (точка каустики находится впереди). В вырожденном случае расстояние каустики может обращаться в бесконечность. Тогда отраженная лучевая трубка параллельна [17, 37, 76].

Суммарные потери при распространении сигнала от n -го отражения до $(n+1)$ -го описываются следующим выражением [76]:

$$PL_n \sim 10 \lg \left| \frac{\rho_n + l_n}{\rho_n} \right|, \quad (12)$$

где $n > 0$,

ρ_n – параметр расстояния до каустики после n -го отражения в метрах,

l_n – расстояние, пройденное лучом от n -го отражения до $(n+1)$ -го в метрах.

Пусть N – общее количество отражений данного луча. Затухание от последнего N -го отражения до точки приемника PL_N описывается той же формулой, где l_N задает расстояние от последнего N -го отражения до точки приемника [76].

Затухание при распространении от передатчика до первого отражения (или до приемника, если текущий луч не имеет отражений) PL_0 задается формулой [91], по смыслу аналогичной формуле (13):

$$PL_0 \sim 10 \lg(l_0) \quad (13)$$

где l_0 – расстояние от передатчика до первой точки отражения в метрах.

В сумме по всем актам отражения получается следующее выражение [76]:

$$PL_{GO} = \sum_{i=0}^N PL_i \sim 10 \lg(l_0) + \sum_{i=1}^N 10 \lg \left| \frac{\rho_n + l_n}{\rho_n} \right| = \\ 10 \lg \left| l_0 \frac{(\rho_1 + l_1)}{\rho_1} \dots \frac{(\rho_N + l_N)}{\rho_N} \right|, \quad (14)$$

где l_0 – расстояние от передатчика до первой точки отражения в метрах,

l_1 – расстояние от первой точки отражения до второй в метрах,

l_N – расстояние от последнего N -го отражения до точки Тх в метрах,

ρ_1 – параметр расстояния до каустики после 1-го отражения в метрах,

ρ_N – параметр расстояния до каустики после N -го отражения в метрах.

Можно показать непосредственной подстановкой, что при отражении только от прямых стен ($a_n = \infty$) [76]:

$$\begin{aligned}
 PL_{GO} &\sim 10 \lg(\rho_N + l_N) = 10 \lg(\rho_{N-1} + l_{N-1} + l_N) = \dots = \\
 &10 \lg(l_0 + \dots + l_{N-1} + l_N) = 10 \lg d,
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где l_0 – расстояние от передатчика до первой точки отражения в метрах,
 l_{N-1} – расстояние от (N-1)-го отражения до последнего N-го отражения в метрах,
 l_N – расстояние от последнего N-го отражения до точки Тх в метрах,
 ρ_{N-1} – параметр расстояния до каустики после (N-1)-го отражения в метрах,
 ρ_N – параметр расстояния до каустики после N-го отражения в метрах,
 d – расстояние вдоль луча в метрах.

Из приведенного способа расчета затухания следует, что оно может обращаться в минус бесконечность децибел в том случае, если $(\rho_n + l_n)$ обращается в ноль для какого-либо n-го отражения, то есть при совмещении точки каустики со следующей точкой отражения или точкой расположения приемника. Такая ситуация является ожидаемым артефактом ГО подхода. Кроме обращения результата в минус бесконечность, может также возникнуть снижение точности модели, если какая-либо точка отражения или точка расположения приемника попадает в достаточно близкую окрестность вокруг каустики [76].

Для устранения данных эффектов, случайно возникающих при определенных положениях передатчика и приемника, и получения гладких результатов применяется следующий прием. Если величина $(\rho_n + l_n)$ при каком-либо n при вычислении PL_{GO} опускается ниже заданного порога по модулю, она приравнивается к величине порога с сохранением знака. Значение порога выбирается так, чтобы результаты предсказания модели были наиболее близки к измеренным данным.

При распространении луча в свободном пространстве внутри тоннелей возникает дополнительный вклад в затухание луча, зависящий от его полной длины [14]:

$$PL_{air} = \frac{\gamma \times d}{2}, \quad (16)$$

где γ – удельное затухание (дБ/м),

d – фактически пройденный данным лучом путь в метрах.

Деление пополам применяется из-за разделения расчета по двум плоскостям.

Удельное затухание зависит от несущей частоты сигнала [47]. Для диапазона 5 ГГц данная величина равна 0.0063 дБ/км и может считаться пренебрежимо малой.

При каждом акте отражения луча от стены только часть излучения отражается в зеркальном направлении (по законам ГО) [24, 37, 76]. Остальная часть поглощается материалами стен и рассеивается под другими углами (это излучение также предполагается потерянными и далее не рассматривается). Для моделирования отражения волны от стены тоннеля строится специальная упрощенная модель самой стены.

1.4.4 Модель стены тоннеля

Реальные стены, как правило, являются бетонными плитами или бетонными, или чугунными тьюбингами [19]. Независимо от типа тьюбинга или плиты, по обеим боковым стенам проложены кабели. Таким образом, большинство стен покрыты достаточно толстым (десятки сантиметров) слоем конструкций с множеством выступов и отверстий, представляющих собой хороший рассеиватель радиоволн рассматриваемых диапазонов.

Рассмотрим для расчета отражений в составе предлагаемой модели расчета затухания сигнала, в качестве упрощенной модели стены, структуру, имеющую две гладкие границы раздела сред. Предлагаемая структура стены отображена на рисунке 7.

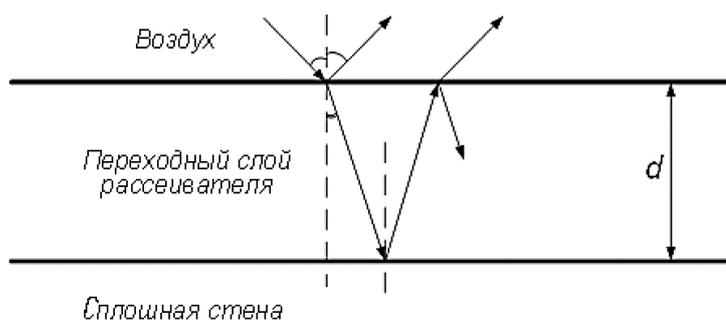


Рисунок 7 – Модель стены с двумя границами раздела сред

Первая граница разделяет воздушную среду внутри тоннеля и эффективный переходный слой, моделирующий рассеиватели. Вторая граница разделяет переходный слой и сплошную стену, в которую, будем считать в рамках наших предположений при построении модели, не проникают волны.

В качестве материала эффективного переходного слоя используется виртуальный материал, отличающийся от воздушной среды наличием относительно небольшой проводимости [1, 17]. Величина проводимости выбирается в таких пределах, чтобы волны рассматриваемых диапазонов частот могли распространяться через материал переходного слоя, но испытывали затухание при распространении (по экспоненциальному закону). Наличие такого затухания условно моделирует потерю мощности из-за рассеяния волны [26, 29]. Будем использовать предложенную нами упрощенную слоистую модель поверхности стен тоннелей метрополитена для построения модели отражения сигнала от стен тоннелей [3].

Данная модель стены имеет два параметра: величину проводимости эффективного материала переходного слоя и толщину переходного слоя. Данные параметры, выбираются по результатам проведенных нами измерений [1, 3, 5]. Указанные параметры могут зависеть от частоты сигнала. На данный момент параметры подобраны для частот в окрестности 5 ГГц.

1.4.5 Расчет затухания сигнала при отражении

В приведенных выше предположениях о модели стены расчет коэффициента отражения производится по известным формулам для тонкого слоя [17]. Величина затухания $PL_{refl}^{(n)}$ для одного акта отражения рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 PL_{refl}^{(n)} &= 20 \lg \left| -\frac{Z_1 \cos \theta_t - jZ_2 \cos \theta_i \operatorname{tg}(dk_2 \cos \theta_t)}{Z_1 \cos \theta_t + jZ_2 \cos \theta_i \operatorname{tg}(dk_2 \cos \theta_t)} \right| \text{ для ТЕ волны,} \\
 PL_{refl}^{(n)} &= 20 \lg \left| \frac{Z_1 \cos \theta_i - jZ_2 \cos \theta_t \operatorname{tg}(dk_2 \cos \theta_t)}{Z_1 \cos \theta_i + jZ_2 \cos \theta_t \operatorname{tg}(dk_2 \cos \theta_t)} \right| \text{ для ТМ волны,}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

где θ_i – угол падения на границу воздух – переходный слой (угол падения в алгоритме трассировки лучей) в градусах,

θ_t – угол отражения от границы воздух – переходный слой (угол падения в алгоритме трассировки лучей) в градусах,

k_1 – волновое число воздуха,

Z_1 – волновой импеданс воздуха,

k_2 – волновое число переходного слоя,

Z_2 – волновой импеданс воздуха переходного слоя,

d – толщина переходного слоя (параметр модели стены) в метрах.

Угол преломления в переходной среде θ_t вычисляется из закона Снеллиуса [20]:

$$k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_t, \tag{18}$$

где θ_i – угол падения в градусах,

θ_t – угол отражения в градусах,

k_1 – волновое число воздуха,

k_2 – волновое число переходного слоя.

Величины k_1 и Z_1 задают волновое число и волновой импеданс воздуха (или вакуума) и вычисляются по формулам [20]:

$$\begin{aligned} k_1 &= 2\pi f(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}, \\ Z_1 &= \mu_0 / \epsilon_0, \end{aligned} \quad (19)$$

где f – частота несущей в Гц,

ϵ_0 – электрическая постоянные вакуума в Ф/м,

μ_0 – магнитная постоянные вакуума в Гн/м.

Величины k_2 и Z_2 задают волновое число и волновой импеданс переходной среды и вычисляются по формулам [20]:

$$\begin{aligned} k_2 &= 2\pi f \mu_0^{1/2} (\epsilon_0 - j\sigma / (2\pi f))^{1/2}, \\ Z_2 &= \mu_0 / (\epsilon_0 - j\sigma / (2\pi f)), \end{aligned} \quad (20)$$

где σ – эффективная проводимость переходного слоя (также являющаяся параметром модели стены) [17, 20].

Важно заметить, что параметры k_2 , Z_2 и θ_t являются комплексными и приведенные формулы должны вычисляться с использованием комплексных функций косинуса и тангенса [17, 20, 26, 29, 57].

Обозначение ТЕ означает, что вектор электрического поля перпендикулярен плоскости падения (плоскости, содержащей падающий и отраженный лучи), обозначение ТМ означает, что вектор магнитного поля перпендикулярен плоскости падения [20]. На практике при вертикальной поляризации антенн для расчетов в горизонтальной плоскости (отражения от боковых стен) используется ТЕ формула, а для расчетов в вертикальной плоскости (отражения от пола и потолка) используется ТМ формула. При горизонтальной поляризации антенн, наоборот, для расчетов в горизонтальной плоскости используется ТМ формула, а для расчетов в вертикальной плоскости – ТЕ формула [17, 20, 26, 29, 57].

При наличии нескольких отражений данного луча от стен тоннеля при его распространении вычисляется суммарное затухание (в децибелах):

$$PL_{refl} = \sum_{n=1}^N PL_{refl}^{(n)}, \quad (21)$$

где N – число отражений данного луча.

1.4.6 Результирующая модель затухания

Комбинирование всех найденных лучей между передатчиком и приемником независимо производится как для расчета в вертикальной плоскости, так и для расчета в горизонтальной плоскости. В каждой плоскости предполагается, что суммарная мощность сигнала в точке приемной антенны равна сумме мощностей всех дошедших до Rx лучей.

Физически суммирование лучей без учета интерференции можно объяснить тем, что каждый луч описывает не пространственно-когерентную плоскую волну, а может быть представлен как достаточно узкий пучок лучей со случайным разбросом фаз внутри пучка. Отсутствие когерентности связано с тем, что в большинстве случаев (кроме очень близких расстояний между передатчиком и приемником) отражения от стен близки к скользящим, пятно отражения захватывает существенную область стены тоннеля, на которой не постоянны ширина тоннеля, форма стены, наличие или отсутствие объектов и выступающих агрегатов и т.д. Поэтому лучи внутри пучка проходят различные пути, разница между которыми может превышать длину волны [17, 20, 61, 76, 140].

Можно заметить, что представленный подход не требует точного расчета изменения эйконала (фазы сигнала) луча при распространении, поэтому это опускалось во всех предыдущих рассуждениях [14, 16, 24, 28, 76].

В соответствии со сказанным выше полная величина затухания в каждой плоскости вычисляется по формуле [14, 17, 76]:

$$PL^{(h)} = -10 \lg \left[\sum_{k=1}^{K^{(h)}} 10^{-PL_k^{(h)}/10} \right], \quad (22)$$

$$PL^{(v)} = -10 \lg \left[\sum_{k=1}^{K^{(v)}} 10^{-PL_k^{(v)}/10} \right],$$

где $PL^{(h/v)}_k$ – затухание, вычисленное для каждого из пришедших лучей в дБ,
 $K^{(h/v)}$ – полное число найденных лучей в данной плоскости.

Предлагаемая слоистая модель поверхности стен тоннелей позволила создать базу для компьютерной модели. После комбинирования рассчитанных величин затухания в двух плоскостях окончательно величина затухания сигнала между входом передающей антенны и выходом приемной антенн вычисляется по формуле [96]:

$$PL = -147.55 + PL^{(h)} + PL^{(v)} + 20 \lg f - (G_{TX}^{max} + G_{RX}^{max}), \quad (23)$$

где G_{TX}^{max} и G_{RX}^{max} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн в максимуме в дБи,

$PL^{(h)}$ – суммарное затухание, вычисленное в горизонтальной плоскости, в дБ,

$PL^{(v)}$ – суммарное затухание, вычисленное в вертикальной плоскости, в дБ,

f – частота несущей в Гц.

Полученная формула (23) является доработанной версией базовой формулы (2). Итоговая формула (23) будет использоваться для расчета величин PL между точками передатчика и приемника, расположенных на линиях метрополитена. Полученная формула имеет стандартный вид для расчета PL [83], нашей задачей было разработать упрощенную математическую базу для расчета слагаемых из (23), связанных с прохождением сигнала расстояния при распространении и отражения от прямых и закругленных стен тоннелей.

Разработанная модель расчета величины PL не учитывает движение точки МС, размещенной на крыше подвижного состава. Модель направлена на расчет PL между двумя фиксированными точками БС и МС. Учет движения точки МС будет рассмотрен в главе 2 диссертационного исследования.

Разработанная модель является приближенной и не учитывает такие эффекты как: диффракционные потери, уникальные коэффициенты поглощения для разных типов материала стен тоннелей, расчет трассировки лучей в трехмерном пространстве, точный учет формы тоннеля. Неучет перечисленных эффектов может приводить к тому, что при проведении экспериментальных исследований поведения сигнала в тоннелях метрополитена и сравнение их с результатами, полученными разработанной моделью, могут возникать расхождения различной величины. Неучет перечисленных эффектов разработанной модели затухания можно отнести к ее недостаткам.

Достоинствами разработанной модели являются: использование известного метода трассировки лучей, который доказал свою эффективность во многих приложениях, разработанная модель стены тоннеля, которая позволяет учитывать рассеивание и поглощение в толстом слое проводов, экспериментальное определение коэффициентов поглощения при отражении от стен. Также достоинствами является относительная простота, возможность развития модели в том числе на другие частотные диапазоны, расширение области применения разработанной модели на участки метрополитена различного типа (открытые участки, эстакады и т.д.).

1.5 Экспериментальное исследование характеристик стен тоннелей

Проведена серия измерений, направленная на определение коэффициента отражения от стен тоннеля и толщины переходного слоя, которые являются параметрами модели. Полученные параметры используются в разработанной модели затухания.

Ниже на рисунке 8 представлена схема установки для измерения коэффициентов отражения от стен тоннелей.

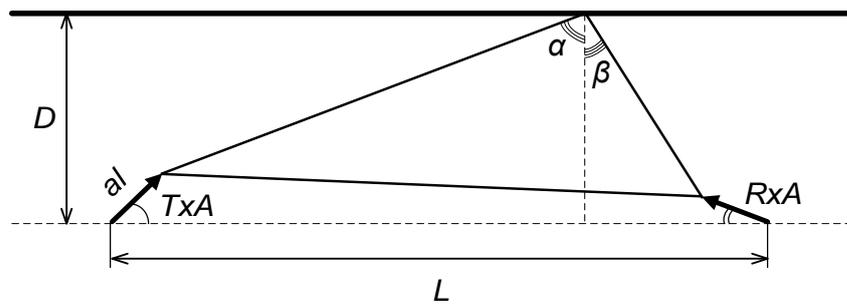


Рисунок 8 – Схема измерительной установки для определения коэффициента отражения от стены

На рисунке: T_{xA} – угол поворота передающей антенны [39], R_{xA} – угол поворота принимающей антенны [39], α – угол падения, β – угол наблюдения, D – расстояние до стены (до характерного уровня наиболее выступающих конструкций), L – расстояние между стойками антенн, al – длина крепления антенн (расстояния от центра стойки до центра излучающего элемента). В модели стены параметр D соответствует расстоянию до границы воздух – рассеивающий слой

На рисунке 9 приведена фотография используемой установки для измерения коэффициентов отражения от стен тоннеля. В измерениях использовались две идентичные антенны [131, 111, 117], закрепленные на поворотных стойках [108].

Стоит отметить, что в данной диссертационной работе не стояла задача исследования влияния различных диаграмм направленности (ДН) на характер распространения радиосигнала. Также не было задачи выбора наилучших антенн для решения поставленной задачи. Используемые антенны с их диаграммами направленности являются входным параметром в разрабатываемой модели распространения.

Антенны на поворотных стойках устанавливались на расстоянии L друг от друга и не сдвигались друг относительно друга во время проведения измерений.

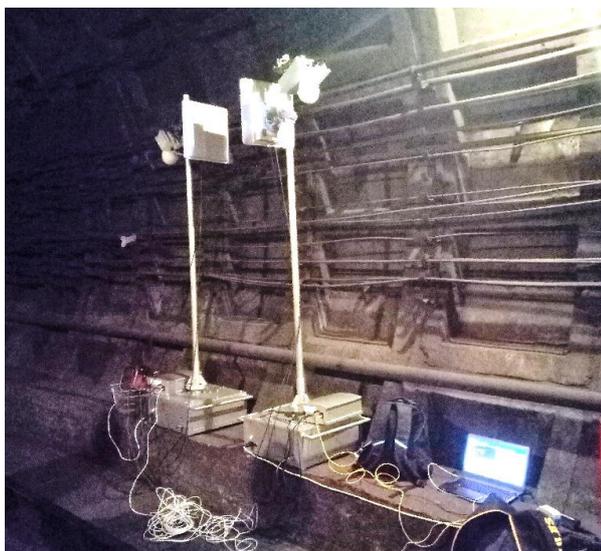


Рисунок 9 – Фотография измерительной установки для определения коэффициента отражения от стены

В результате вращения стоек каждая антенна ориентировалась главным лепестком диаграммы направленности с коэффициентами усиления G_{Tx} и G_{Rx} под углами TxA для передающей антенны и RxA для принимающей антенны относительно прямой, соединяющей стойки антенн. Ширина диаграммы направленностей используемых антенн составляет 15° – 20° [39]. Диапазон изменения углов составлял от 0 (антенны смотрят друг на друга) до 90 (обе антенны смотрят на стену) градусов. Углы TxA и RxA в ходе измерений принимали 11 значений: 5.4° , 9° , 18° , 27° , 36° , 45° , 54° , 63° , 72° , 81° и 90° независимо, таким образом всего насчитывается 121 ориентация антенн по углам. Пример полученной матрица потерь представлен в таблице 2. Приведенные значения PL в условных дБ и не соответствуют PL мощности от Tx до Rx. По горизонтальной оси отложены значения угла RxA , по вертикали – значения угла TxA .

Таблица 2 – Пример матрицы потерь

PL (path loss), dB											
	5.4°	9°	18°	27°	36°	45°	54°	63°	72°	81°	90°
5.4°	-181	-182	173	137	455	655	-255	825	621	480	506
9°	697	858	394	446	-387	522	-440	443	197	-391	-29
18°	-163	232	-371	542	884	-278	-404	599	65	480	-125

27°	563	-302	129	659	-91	-343	609	315	589	-604	-421
36°	-232	-318	301	557	111	-63	-239	306	-637	348	-132
45°	364	655	629	303	-286	-171	285	-303	419	-133	305
54°	518	-136	-194	338	406	-179	756	558	-45	605	-343
63°	-42	376	-35	761	299	-108	-278	419	-274	-168	649
72°	763	555	161	751	-137	410	96	628	243	-109	134
81°	198	31	255	-54	54	-205	33	222	140	-96	740
90°	73	469	238	27	374	348	47	338	140	2	291

Затем расстояние L между антеннами изменялось и проводились следующие измерения при различных комбинациях углов.

Длина антенны a_l равняется 20 см. Углы падения α и отражения β отсчитываются от нормали. Параметр D , обозначающий расстояние от стен тоннеля до стоек антенн, изменялся в пределах 0,4–1,2 метра. Параметр L , обозначающий расстояние между стойками антенн, изменялся в пределах от 1 до 12 метров.

В результатах даны погрешности измерений, основанные на абсолютных погрешностях величин, измеренных напрямую. Погрешности этих величин приведены в таблице 3 [39]. Значения, приведенные в таблице, показывают точность выставления углов и расстояний при проведении измерений.

Таблица 3 – Погрешности измеряемых величин

Величина	Абсолютная погрешность приборов
T_{xA}	3°
R_{xA}	3°
D	1 см
L	1 см
a_l	1 см
G_{tx}	1 дБи
G_{rx}	1 дБи

В результате проведенных измерений удалось получить матрицу мощностных потерь для каждого расположения антенн. Размерность матрицы

11 x 11 соответствует всем комбинациям положений углов антенн. Для каждого значения L определялась своя матрица потерь. Матрицы были получены для каждого расстояния между антеннами внутри одного перегона и для всех исследуемых перегонов. Исследовались перегоны с разным материалом стен. Во внимание принимаются точки с наименьшими измеренными потерями. Коэффициент отражения вычисляется по формуле [96]:

$$R = FSPL - (G_{tx} + G_{rx}) - PL_{meas.}, \quad (24)$$

где R – коэффициент отражения [20],

$FSPL$ – затухание в свободном пространстве по формуле Фрииса (1) [20],

G_{tx} – коэффициент усиления передающей антенны в дБи [39],

G_{rx} – коэффициент усиления приемной антенны в дБи [39],

$PL_{meas.}$ – измеренное затухание сигнала в дБ. Величины PL рассчитывались для модели затухания мощности сигнала при отражении от слоистой структуры.

В качестве результатов измерений представлены зависимости коэффициента отражения от угла падения. Результаты измерений сравниваются с разработанной теоретической моделью затухания мощности сигнала в слоевой структуре (17).

В ходе проведения серии измерений был измерен модуль коэффициента отражения (24) от стен тоннелей круглого сечения из различных материалов и текстур. Параметр L , обозначающий расстояние между стойками антенн, изменялся в пределах от 1 до 12 метров. Параметр D , обозначающий расстояние от стен тоннеля до стоек антенн, изменялся в пределах 0,4–1,2 метра. Величина данного параметра выбиралась в зависимости от условий проведения измерений на различных участках тоннелей. Полученные зависимости приведены на рисунках 10–11 и соответствуют двум различным поляризациям антенн. На графиках приведены измеренные значения коэффициента отражения (24), приведенных в дБ, в зависимости от величины угла падения, выраженного в градусах, для различных типов материала стен тоннелей: concrete – бетон, smooth concrete – гладкий бетон,

cast iron – чугун [19]. Измеренные значения на графике отмечены различными маркерами в зависимости от материала стен. Непрерывные кривые соответствуют результатам, полученным математически моделированной слоистой модели.

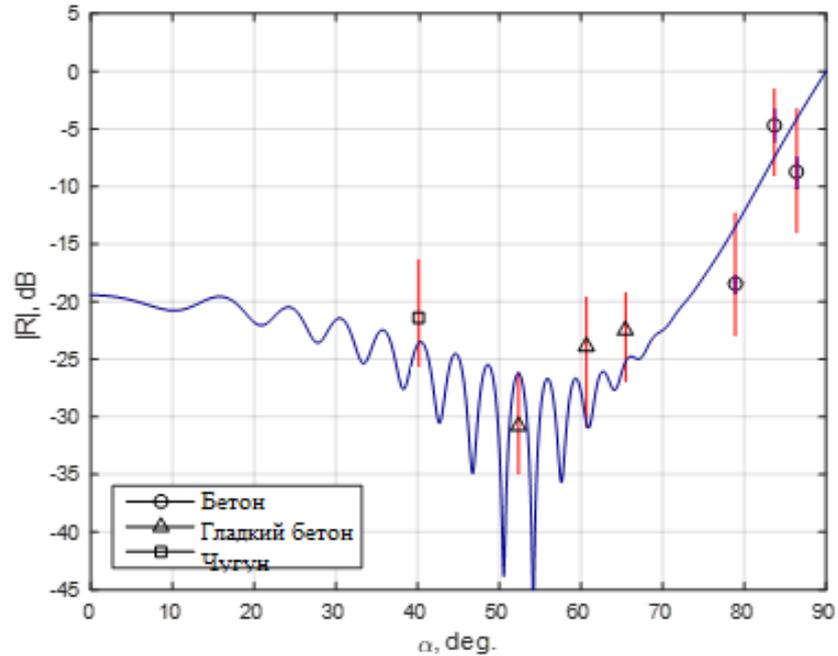


Рисунок 10 – Модуль коэффициента отражения от угла падения для всех зон измерений. Вертикальная поляризация

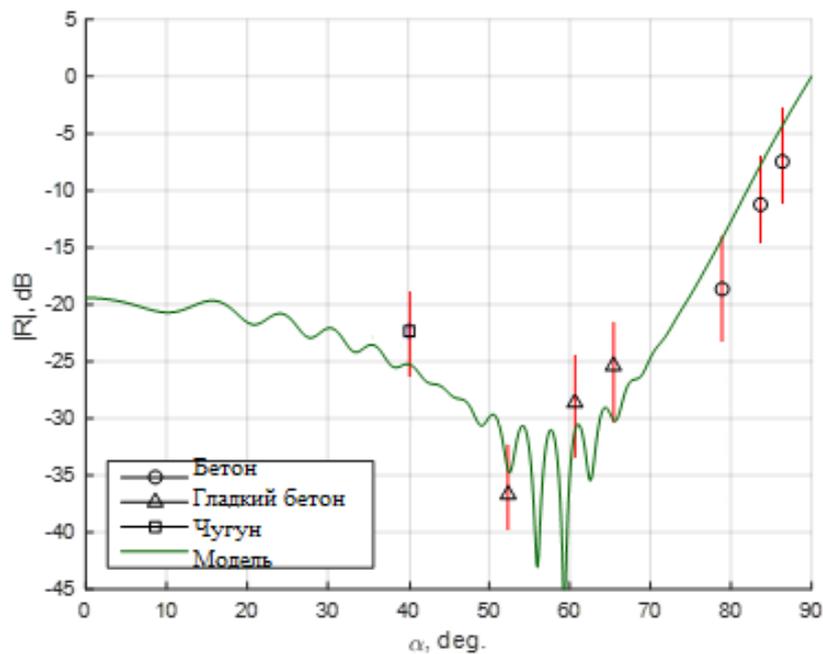


Рисунок 11 – Модуль коэффициента отражения от угла падения для всех зон измерений. Горизонтальная поляризация

Также на измеренных точках отображены уровни погрешностей измерений красными отрезками [29, 34]. Значения параметров экспериментальной установки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры измерительной установки по измерению R (24)

Параметр	Диапазон величины
L (расстояние между стойками антенн)	1 м – 12 м
D (расстояние от стен тоннеля до стоек антенн)	0,4 м – 1,2 м
Угол отражения от стены ($90^\circ - R \times A$)	$40^\circ - 90^\circ$
Ширина главного лепестка ДН антенн	5 град.
Коэффициент усиления (КУ) антенн	18 дБи

Представленные результаты измерений имеют достаточно высокие погрешности, что связано, главным образом, с невозможностью точного позиционирования измерительного оборудования по углу в условиях метрополитена и с достаточно большой шириной главного лепестка используемых антенн [29, 34]. Так как ширина лепестка обратно пропорциональна размеру антенн, то применение антенн с более узким лепестком в условиях метрополитена также становится очень сложным для практической реализации [37].

Как было сказано ранее, в формирование погрешностей итоговых измеренных величин, представленных на рисунках 10 и 11 вклад вносят погрешности приборов, абсолютные значения которых представлены в таблице 3. Указанные погрешности оказывают влияние на точность позиционирования измерительного оборудования, что приводит в большей степени к ошибке смещения измеренных данных. Погрешности, обозначенные на рисунках 10 и 11 вертикальными красными линиями в экспериментально измеренных точках, определены как дисперсия вектора измеренных значений при фиксированных значениях параметров. В каждой экспериментально измеренной точке была проведена серия измерений из 100 измерений. Математическое ожидание является величиной, отмеченной на рисунках 10 и 11 как экспериментальные значения, дисперсия измеренного вектора значений определяют погрешность. Средняя величина погрешности измерений составила $\pm 4-5$ дБ.

В пределах имеющейся точности измерений невозможно увидеть различие в характеристиках отраженного излучения, связанное с материалами стен. По этой причине в текущей модели затухания было решено предполагать единые усредненные параметры эффективной проводимости и толщины рассеивающего слоя для всех тоннелей [26].

Приведенные измеренные точки сравниваются с моделью отражения от эффективного рассеивающего слоя, покрывающего сплошную стену, с параметрами $d = 60$ см и $\sigma = 0,01$ См/м. Как можно видеть, кривая, задаваемая моделью, везде находится в коридоре погрешностей. Многие измеренные точки при этом достаточно близки и окружают модельную кривую.

При выборе параметров было учтено, что правая часть кривой (правее приблизительно 70°) определяется только эффективной проводимостью слоя, а толщина слоя значения не играет. Это объясняется тем, что при скользящем падении существенная часть излучения отражается, а внутрь рассеивающего слоя излучение практически не попадает [26, 29, 37, 57]. На практике это означает, что при скользящем падении существенная часть мощности отражается от наиболее выступающих конструкций стены тоннеля, и отражения становятся все ближе к зеркальному по мере увеличения угла падения [29]. Этот вывод качественно совпадает со свойствами рассеяния волн при отражении от поверхности с неровностями.

Важно заметить, что именно область кривой при больших углах падения имеет наибольшее значение при расчетах затухания в тоннелях, так как при всех представляющих интерес расстояниях между передатчиком и приемником отражения от стен становятся близкими к скользящим [26, 29, 37, 57].

Параметр толщины слоя играет роль при углах падения на стену, близких к нормальным. В этом случае излучение плохо отражается от границы раздела воздух – рассеивающий слой, а в основном отражается уже от границы рассеиватель – сплошная стена (отражатель). При этом значительная часть мощности теряется при распространении внутри рассеивающего слоя при прохождении до сплошной стены и обратно [26, 29, 57]. Такое поведение также корректно описывает

качественное изменение сигнала при падении на стену с неровностями [26]. Потери при распространении внутри рассеивающего слоя при этом моделируют физическое рассеяние на неровностях стены, которое максимально именно при нормальном падении волны [26, 29, 37, 57].

1.6 Экспериментальное исследование затухания сигнала

В рамках диссертационной работы проведена серия измерений в метрополитене, которая заключалась в измерении потери мощности сигнала между передатчиком и приемником на участках метрополитена различного типа: тоннели, открытые(наземные) участки, станции.

Целью проведенных измерений является сравнение величин затуханий сигнала, полученных на выходе модели затухания, и измеренных значений.

1.6.1 Исследование затухания сигнала в тоннелях

В измерениях использовались две антенны, характеристики которых приведены в спецификации [127]. Антенны располагались в центре поперечного сечения тоннеля вдоль оси тоннеля. Максимумы диаграмм направленности антенн ориентировались вдоль прямой, соединяющих антенны, или вдоль касательной к закруглениям путей на больших расстояниях. Ширина диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости составляет приблизительно 50° и 20° в вертикальной плоскости [127]. Антенны имели вертикальную поляризацию.

Схема измерений приведена на рисунке 12. На рисунке отмечены условные границы тоннеля сплошными линиями, пунктирной линией отмечена ось тоннеля, RxА и TxА – антенны передатчика и приемника, установленные на штативах высотой 2,5 метров, L – расстояние между штативами, которое измерялось в пределах от 10 до максимум 600 метров (на последующих графиках значение параметра L отложено по оси x и обозначено как Tx-Rx distance).

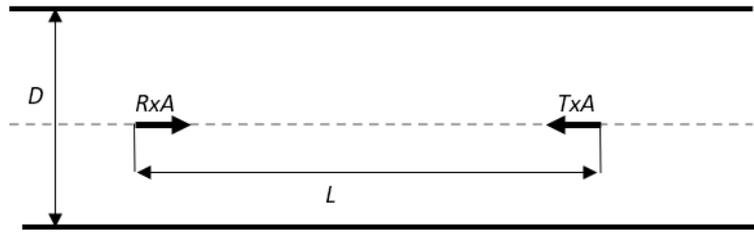


Рисунок 12 – Схема эксперимента по определению PL между точками Tx и Rx

Измерения проводились в тоннелях разного типа. Высота установки антенны над полом во всех измерениях составляла примерно 2,5 м. Высота тоннеля на участках измерений равна 4,2 м. Ширина тоннеля на участке Рижская – Алексеевская равна 5,8 метра, на других участках – 4 метра. На рисунках 13–16 приведены кривые зависимостей величины потери мощности сигнала при распространении между передатчиком и приемником (PL – path loss) в децибелах от расстояния между передатчиком и приемником в метрах. На всех графиках приведены две кривые: measurements – значения потерь мощности сигнала, полученные при измерениях, propagation model – значения, полученные с помощью разработанной модели (23), рассмотренной в главе 1.

Обозначения на рисунках 13–20: Tx-Rx distance – расстояние между передатчиком и приёмником; Path loss (dB) – величина потерь мощности сигнала в децибелах; Measurements – экспериментально измеренные значения PL; Propagation model – значения PL, рассчитанные разработанной моделью (23).

Три последние точки на рисунке 14 были измерены на станции. Более точно: начало платформы располагается на расстоянии 478 м от передатчика, а конец платформы – на расстоянии 636 м от передатчика.

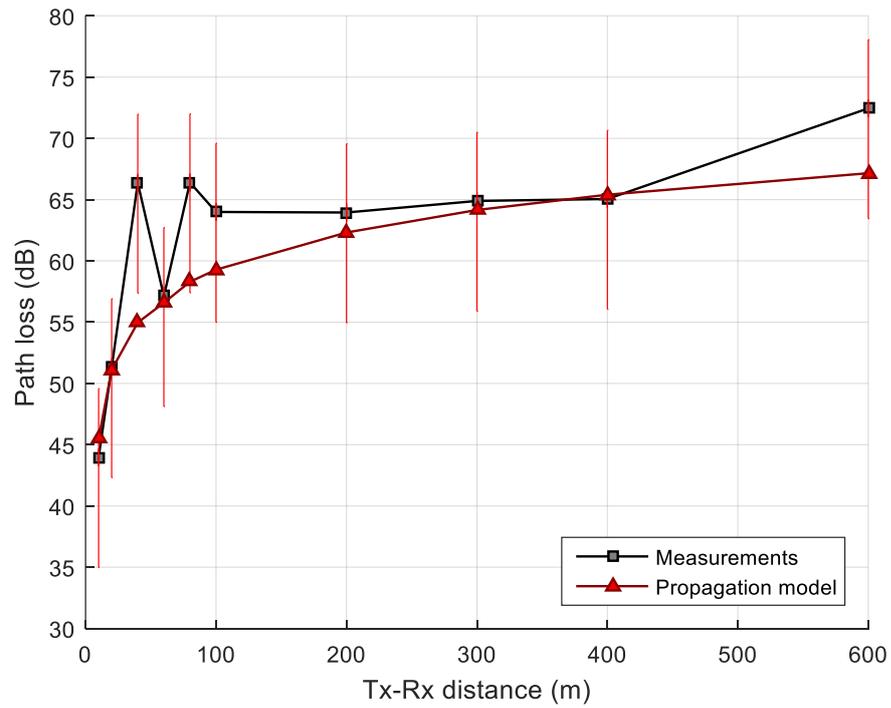


Рисунок 13 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Рижская – Алексеевская. Чугунный тоннель круглого сечения.

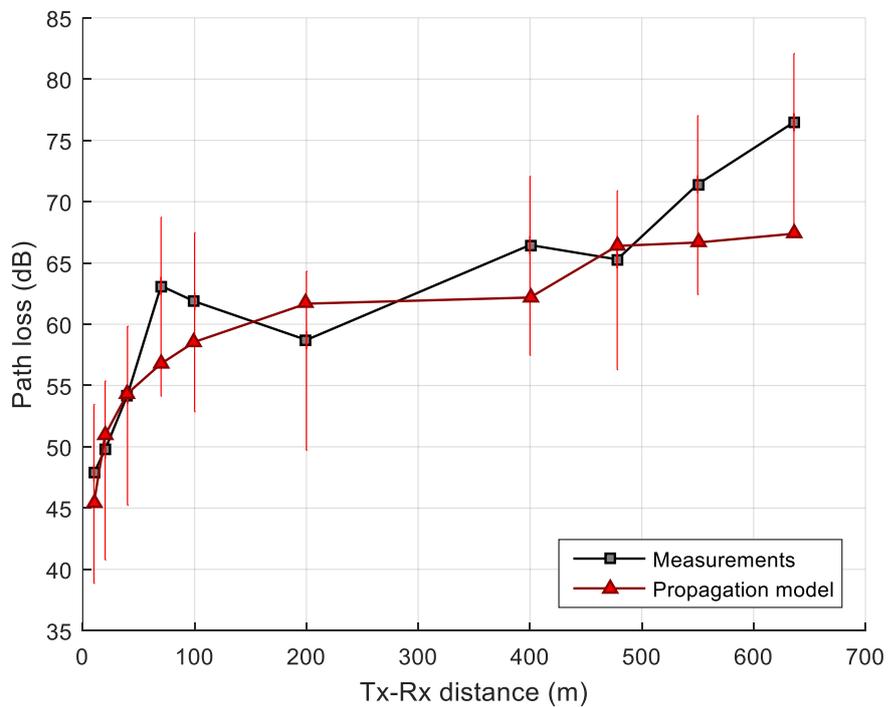


Рисунок 14 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Профсоюзная – Новые Черемушки. Бетонный тоннель круглого сечения

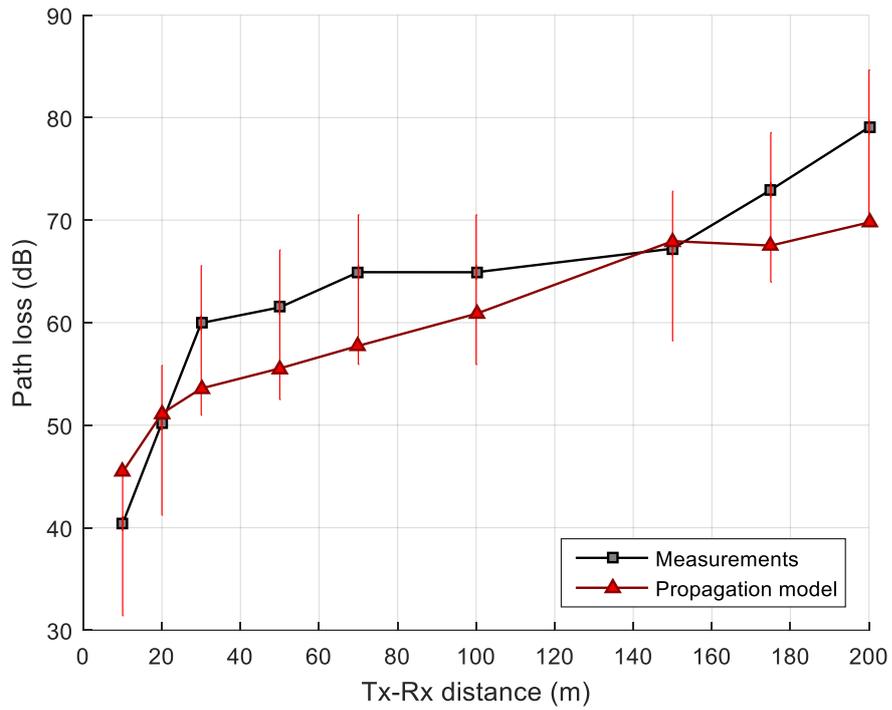


Рисунок 15 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Третьяковская – Китай-город. Чугунный тоннель круглого сечения

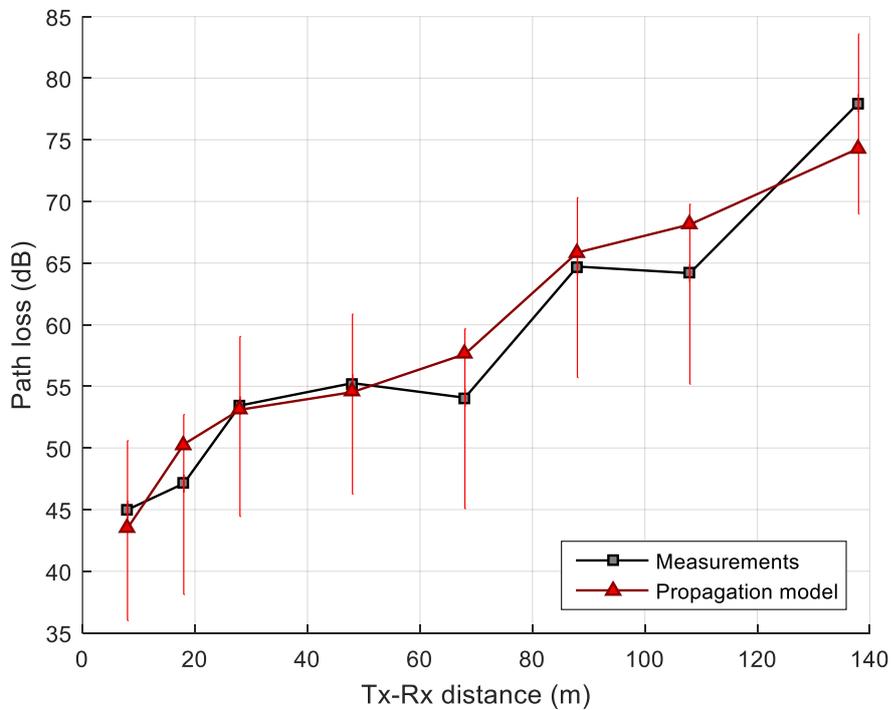


Рисунок 16 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Первомайская – Измайловская. Бетонный тоннель прямоугольного сечения

На рисунках 13–16 приведены погрешности измерений. Ошибка угла ориентации антенн в вертикальной и горизонтальной плоскостях предполагалась равной 5° . Ошибка угла изначальной фиксации антенн на стойках составляет приблизительно 3° .

В формирование погрешностей итоговых измеренных величин, представленных на рисунках 13–16 вклад вносят погрешности приборов, абсолютные значения которых представлены в таблице 3. Указанные погрешности оказывают влияние на точность позиционирования измерительного оборудования. Погрешности, обозначенные на рисунках 13–16 вертикальными красными линиями в экспериментально измеренных точках, определены как дисперсия вектора измеренных значений при фиксированных значениях параметров. В каждой экспериментально измеренной точке была проведена серия измерений из 50 измерений. Математическое ожидание является величиной, отмеченной на рисунках 13–16 как экспериментальные значения, дисперсия измеренного вектора значений определяют погрешность.

Сравнение затуханий, предсказанных предложенной моделью (23), и измеренных затуханий показывает, что в подавляющем большинстве случаев их разница укладывается в погрешности измерений. Предсказанные точки достаточно близки к измеренным, типичная величина расхождения не превышает 5–7 дБ.

Имеющиеся расхождения результатов могут объясняться, кроме ошибок измерений, неточностями самой модели (использованные идеализации и упрощения) и неточностями задания геометрии тоннеля (предположения о постоянстве размеров и формы поперечного профиля, отсутствии учета гидрозатворов, боковых дверей и прочих подобных объектов) [19]. Важно отметить, что результаты данных измерений были также использованы для уточнения параметров модели отражения сигнала от стен.

Для иллюстрации адекватного выбора величин параметров на рисунке 17 построены зависимости величины PL от расстояния между передатчиком и приёмником при разных значениях проводимости переходного слоя σ при

фиксированной частоте сигнала и фиксированной толщине переходного слоя. Значения PL рассчитаны разработанной моделью затухания сигнала (23).

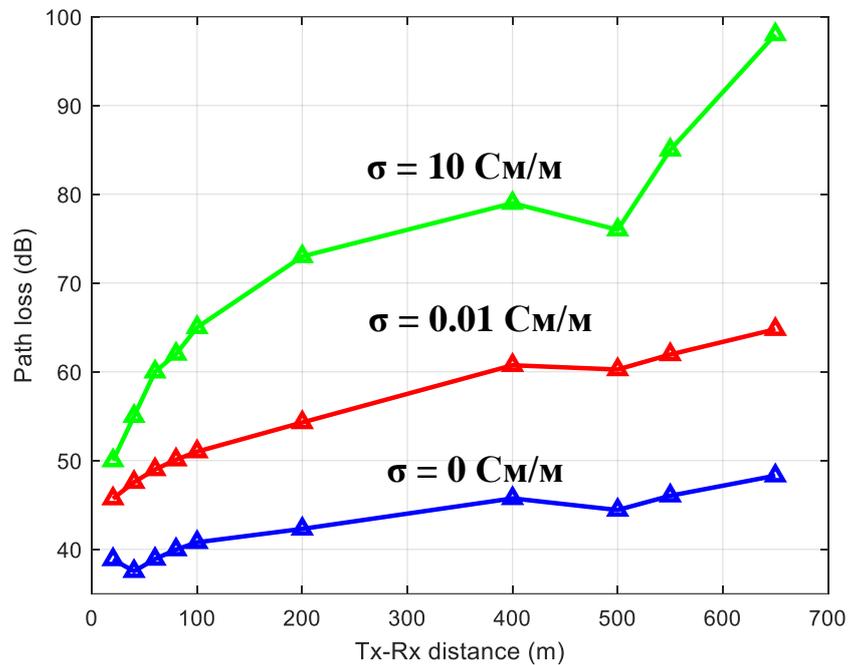


Рисунок 17 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на участке Профсоюзная – Новые Черемушки при разных значениях проводимости переходного слоя

Результаты, приведенные на рисунке 17, согласуются с теоретическими моделями. При значении проводимости равно нулю, при отражении лучевой трубки от пограничного слоя, энергия не рассеивается в слое, следовательно, значения PL значительно ниже. При значении проводимости сильно больше выбранной экспериментально, мощность сигнала в переходном слое при отражении затухает сильнее. Следовательно, модель (23) ведет себя адекватно в соответствии с физическими законами. Выбранное значение проводимости с достаточной точностью описывает поведение сигнала при отражении от стен тоннеля, что подтверждается результатами, приведенными на рисунках 13–16.

В целом результаты калибровки модели позволяют заключить, что точность предсказания затухания для целей радиопланирования и расстановки базовых станций является приемлемой.

1.6.2 Исследование затухания сигнала на наземных участках

Наряду с подземными участками, в метрополитене присутствуют открытые участки пути [19]. К открытым участкам были отнесены эстакады над поверхностью земли и наземные участки. Модель затухания (23) используется для предсказания затухания на открытых участках обоих типов [3]. Отличием разработанной модели затухания (23) при применении на открытых участках является отсутствие стен, то есть в горизонтальной плоскости отражения сигнала полностью отсутствуют, расчет затухания сходится к (14), величина которого зависит только от пройденного расстояния. В вертикальной плоскости отсутствуют отражения от потолка, но присутствуют отражения от пола.

В ходе одной из серий измерений проводились измерения затухания сигнала вдоль открытых участков пути, когда обе антенны [127] располагались выше уровня боковых ограждений (данное предположение также верно и для используемых антенн БС и подвижного состава). При этих условиях можно приближенно говорить о распространении сигнала в свободном пространстве.

Измерения в метрополитене состояли в измерении потери мощности сигнала между зафиксированным передатчиком и приемником, перемещаемым на определенные расстояния вдоль пути. В измерениях использовались две идентичные антенны [127]. Антенны располагались приблизительно в центре поперечного сечения тоннеля вдоль оси тоннеля или пути на открытых участках и станциях. Максимумы диаграмм направленности антенн ориентировались вдоль касательной к кривой путей в точке расположений каждой антенны в направлении на другую антенну. Использовалась вертикальная поляризация.

На графиках измерений приведены характерные погрешности. В расчете величины погрешностей учитывались два доминирующих источника ошибки измеренного затухания: неточность ориентации антенн вдоль путей и неточность оценки принятой мощности в проемном устройстве измерителя [34].

Ошибка угла ориентации антенн предполагалась равной $\pm 1.5^\circ$, что соответствует характерным ошибкам визуальной ориентации антенны вдоль пути.

Результирующая ошибка в уровне затухания складывается из ошибок ориентации двух антенн в двух плоскостях: азимутальной и угла места с учетом формы диаграммы направленности [34]. Ошибка оценки принятой мощности предполагается равной ± 1 дБ, что соответствует характеристикам используемого измерителя. В сумме по всем факторам величина погрешности составила около ± 4 дБ. Предложенная методика использовалась для всех приведенных ниже измерений (как для открытых участков, так и вдоль станций).

Измерения проводились на открытом наземном участке линии [19]. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,46 м. Измерения проводились на двухпутном участке линии: расстояние между осями путей – 20 м, между ограждением и осью ближайшего пути – 4,2 м. Общая ширина зоны – 28,4 м. Высота ограждений – 2 м.

На графиках (рисунки 18–19) приведены кривые зависимостей величины потери мощности сигнала при распространении между передатчиком и приемником в децибелах от расстояния между передатчиком и приемником в метрах. На всех графиках приведено по две кривые: *measurements* – значения, полученные по результатам измерений, и *propagation model (free-space)* – значения, полученные расчетом на основании модели затухания сигнала при распространении в открытом пространстве.

Измерения проводились на открытом участке линии. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,44 м. Измерения проводились на двухпутном участке линии: расстояние между осями путей – 11,18 м, между ограждением и осью ближайшего пути – 2,26 м. Общая ширина – 15,7 м. Высота ограждений – 2 м.

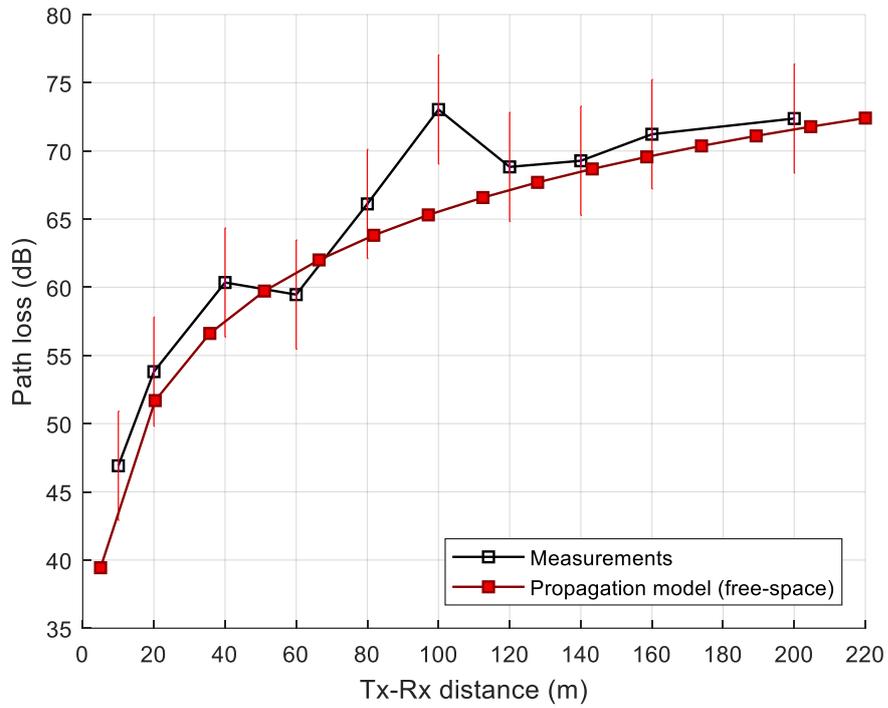


Рисунок 18 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Багратионовская – Филевский парк

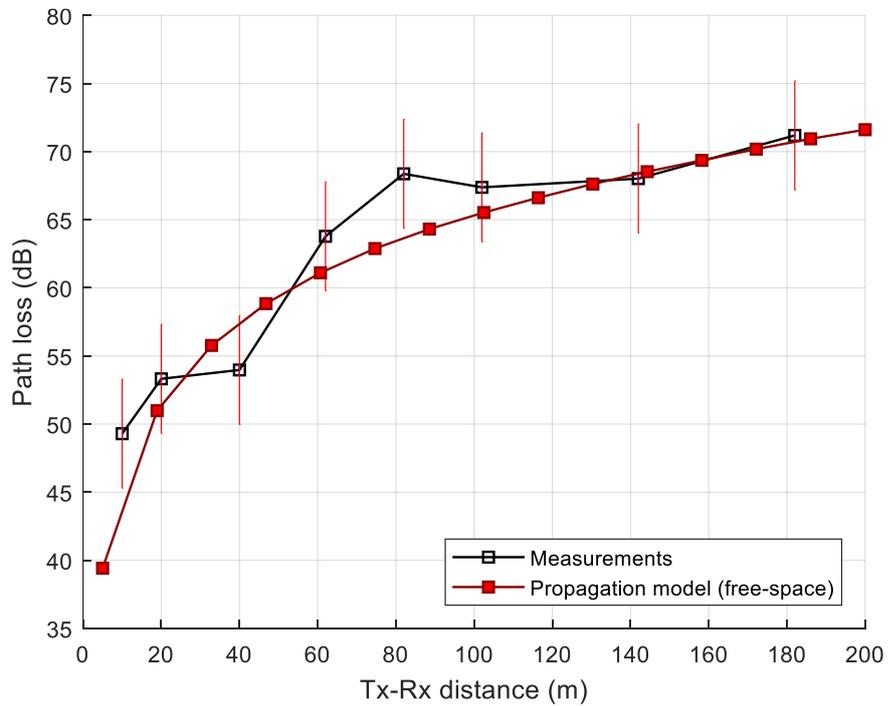


Рисунок 19 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на перегоне Бульвар Адмирала Ушакова – Улица Горчакова

Для большинства измеренных точек предсказанное затухание и измеренное затухание достаточно близки, а их разница укладывается в пределы погрешностей измерений, равной ± 4 дБ. Небольшое отклонение за пределы погрешностей для трех точек из представленного множества может объясняться как неудачной ориентацией антенны в соответствующих точках расположения приемника (например, из-за неровностей поверхности в месте установки штатива антенны), так и наличием факторов затухания сигнала, не учтенных в модели. К таким факторам можно отнести слабые отражения сигнала от поверхности земли (пола) и других конструктивных элементов путей.

В целом, можно заключить, что точность предсказания затухания на открытых участках является достаточной для целей радиопланирования и расстановки базовых станций.

1.6.3 Исследование затухания сигнала на станциях

Также были проведены измерения затухания сигнала вдоль станций различного типа, когда обе антенны располагались на оси путей [19]. Результаты измерений сравниваются с теоретическими результатами, полученными для закрытого или открытого тоннеля, в соответствии с типом анализируемой станции.

На графиках рисунков 20–21 приведены кривые зависимостей величины потери мощности сигнала при распространении между передатчиком и приемником (PL – path loss) в децибелах от расстояния между передатчиком и приемником в метрах. На всех графиках приведено по две или три кривые: measurements – значения, полученные по результатам измерений на станциях, propagation model (free-space) – значения, полученные расчетом на основании модели затухания сигнала при распространении в открытом пространстве (на участках вне тоннелей, это могут быть эстакадные или наземные участки линий, где поведение сигнала близко к поведению сигнала при распространении в свободном пространстве), propagation model (tunnel) – значения, полученные

расчетом на основании модели затухания сигнала при распространении в открытом пространстве.

На рисунке 20 измерения проводились в пределах станции Филевский парк и на прилегающих к ней участках линии. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,46 м. Измерения проводились на двухпутном участке линии: расстояние между осями путей – 20 м, между ограждением и осью ближайшего пути – 4,2 м. Общая ширина – 28,4 м. Высота ограждений на прилегающих участках – 2 м. Конструкция станции – наземная с островной платформой. Навес над платформой поддерживается колоннами. Границы расположения станции показаны на рисунке ниже пунктиром: 30 м и 150 м.

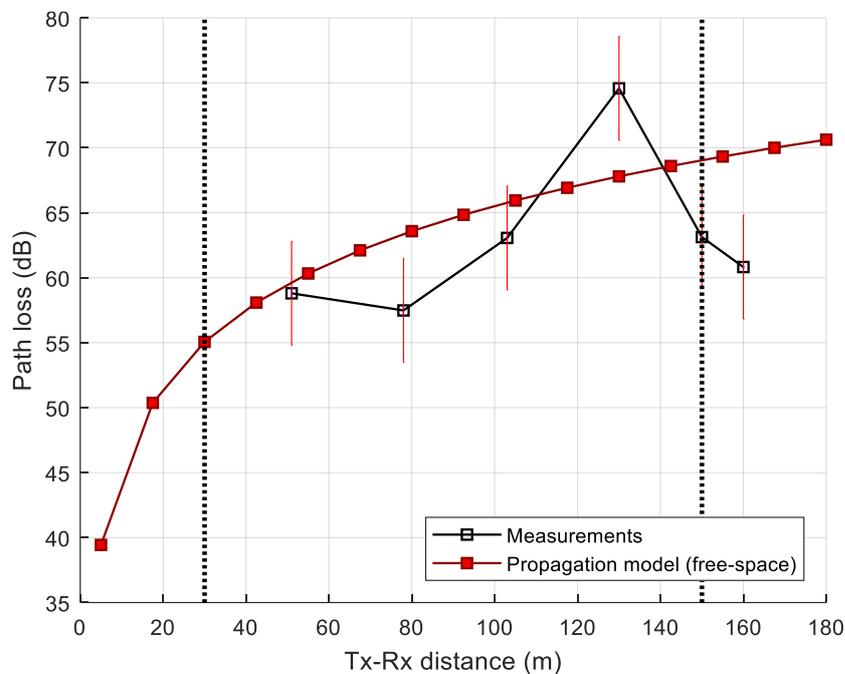


Рисунок 20 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на ст. Филевский парк

На рисунке 21 измерения проводились в пределах станции Люблино и на прилегающих к ней участках линии. Высота установки обеих антенн над полом составляла 2,4 м. Прилегающие участки линии расположены в тоннелях с бетонной гладкой отделкой квадратного сечения шириной и высотой по 4,5 м.

Конструкция станции – односводчатая, мелкого заложения. Свод образует сплошную нишу. Платформа островная, прямая, на высоте 1,3 метра. Границы расположения станции показаны на рисунке ниже пунктиром: 60 м и 220 м.

Зависимость измеренных значений затухания от расстояния обладает достаточно сложной формой, с периодическими участками увеличения и уменьшения относительно затухания в аналогичном регулярном тоннеле. На рисунке 21 приведены значения PL, полученные по результатам измерения (Measurements), значения PL, рассчитанные с помощью разработанной модели затухания сигнала в тоннелях (Propagation model (tunnel)), и значения PL, рассчитанные с помощью разработанной модели затухания сигнала на открытых участках (Propagation model (free-space)).

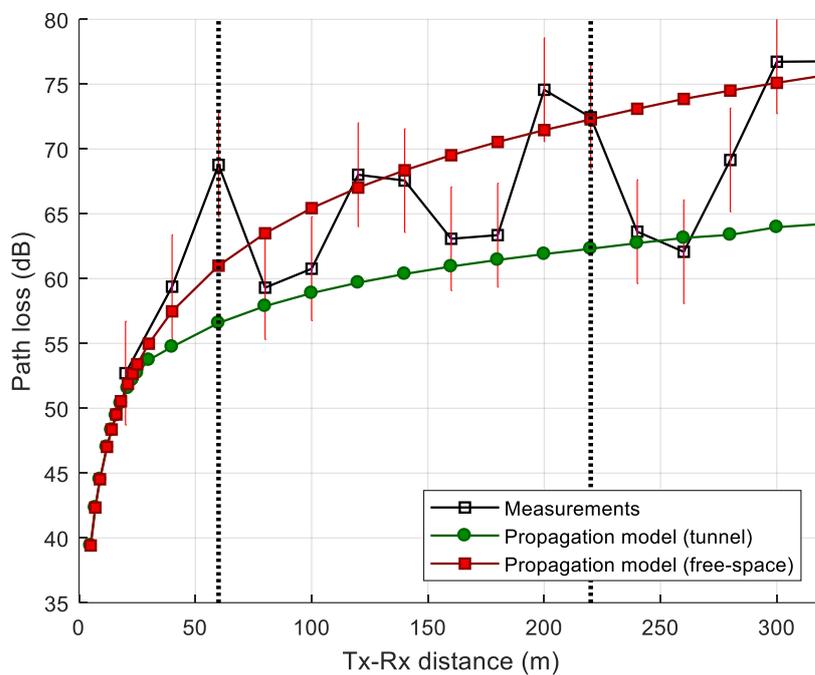


Рисунок 21 – Зависимость потерь сигнала от расстояния на ст. Люблино

Для открытых участков повышение величины затухания можно объяснить перекрытием (полным или частичным) трассы сигнала конструкциями станции. Снижение затухания в отдельных точках объясняется фокусирующим (волноводным) влиянием конструкций станции, когда сигнал в точке приема образуется в результате комбинации прямого и нескольких отраженных сигналов аналогично распространению в тоннелях [19, 37, 45]. Практически случайное поведение кривой вдоль станции объясняется появлением и исчезновением

подходящих отражающих поверхностей в точках возможного отражения, что определяется детальной геометрией станции.

Для тоннелей наличие станции всегда (в пределах погрешностей) приводит к увеличению затухания. Физическое объяснение увеличения затухания состоит в том, что на станции исчезает фокусирующее (волноводное) влияние тоннеля, и сигнал распространяется во всем пространстве станции аналогично открытому участку линии [14, 20, 37]. Данное объяснение хорошо подтверждается тем, что для большинства измеренных точек (в пределах погрешностей) измеренное затухание на станциях линий закрытого типа лежит между модельными кривыми для открытого и закрытого типа путей.

Аналогично открытым участкам линии, случайность формы кривой и смена областей повышения и понижения затухания объясняется случайным возникновением и исчезновением подходящих отражающих поверхностей в соответствии с детальной геометрией станции. При наличии отражающих поверхностей в нужных точках (например, в середине трассы между передатчиком и приемником для однократного отражения луча) величина затухания совпадает с моделью затухания в тоннеле [20]. При отсутствии подходящих отражающих поверхностей величина затухания совпадает с моделью затухания в свободном пространстве, где также присутствует только один луч прямой видимости [96]. При частичном наличии отражающих поверхностей величина затухания лежит между модельными кривыми.

На данном этапе для учета данных эффектов в модели затухания предлагается реализовать упрощенный способ, где влияние станции моделируется добавлением фиксированного дополнительного затухания к расчетному [79, 87, 92, 116]. Величина затухания должна быть консервативно выбрана равной максимальному наблюдаемому дополнительному затуханию на измеренных кривых. Для станций открытых участков пути она в среднем составляет 7 дБ и характеризуется сравнительно небольшим отклонением значений. Для подземных станций она примерно равна 14 дБ и характеризуется большим отклонением от среднего. Приведенные величины характеризуют дополнительное затухание на

всей длине станций, что составляет примерно 150 метров. Удельные величины дополнительного затухания равны 0,05 дБ/м и 0,1 дБ/м соответственно.

Как было сказано в начале главы, разработанная модель рассчитана на диапазон 5–6 ГГц, точная калибровка выполнялась на частоте 5 ГГц. Детальное исследование влияния смещения частоты от калибровочной на характер распространения не проводилось. Разработанная модель с достаточной степенью точности считаем универсальной для рассматриваемого диапазона 5–6 ГГц. Величина потерь мощности сигнала пропорциональна $20 \cdot \log_{10} f$ [МГц], для границ рассматриваемого диапазона разница только от изменения частоты будет около 2 дБ, при том, что средняя погрешность разработанной модели (23) равна 5 дБ. Изменения частоты в рамках интересующего диапазона считаем незначительными для модели, так как они меньше погрешности модели.

1.7 Дополнительные сценарии в модели затухания

Помимо тоннельных участков в метрополитене встречаются участки, отличающиеся по геометрии от узких закрытых тоннелей. К таким участкам относятся: открытые участки, станции метрополитена подземные и наземные. При расчете затухания сигнала на этих участках требуется учет дополнительных потерь. Рассматривается возникновение дополнительного затухания в случае установления соединения поезда с базовой станцией, которая перекрыта телом самого поезда, через задний лепесток диаграммы направленности антенн, установленных на крыше поездов. Также, в метрополитене, при реальной эксплуатации высока вероятность возникновения эффекта перекрытия радиоканала «поезд – БС» другим поездом. При котором также необходимо вносить дополнительные поправки в затухание к расчетному по (23) значению.

Предполагается, что на **открытых участках** пути из-за отсутствия стен нет множества переотраженных лучей, существующих для закрытого участка пути. Для участков данного типа существует луч прямой видимости, проходящий между точками расположения передатчика и приемника, и луч, отраженный от пола [112].

Для нахождения траектории луча прямой видимости алгоритм трассировки не используется, поскольку его траектория является достоверно известной и определяется точками расположения передатчика и приемника.

Дальнейшие расчеты итоговой величины затухания выполняются аналогичным образом, как для случая распространения в закрытом тоннеле [3, 5]. Компоненты затухания луча для открытого участка, как в горизонтальной, так в вертикальной плоскости, характеризуются величиной затухания по законам ГО (15). Величина затухания вследствие отражения от стен (17), (21) в данном случае отсутствует.

Наряду с однопутными участками, в метрополитене встречаются **двухпутные участки**, для моделирования которых была обновлена соответствующая часть модели, отвечающая за общую геометрию [1, 19]. К двухпутным участкам закрытого типа относятся совмещенные тоннели, где полностью или частично отсутствует разделительная стена между путями встречного направления [1, 19]. Также к двухпутным участкам относятся все участки открытого типа.

Основные отличия модели двухпутного участка:

1. Увеличенная ширина в горизонтальной плоскости;
2. Наличие двух соседних путей. На двухпутных участках БС устанавливаются вдоль одной стороны участка, но обслуживают поезда обоих направлений движения, движущихся по соседним путям. Для ближнего к установленным БС пути расчет затухания ничем не будет отличаться от однопутного наземного участка. Для дальнего от ряда БС пути величина PL , рассчитанная по модели затухания (23), может отличаться из-за того, что антенны поезда БС будут ориентированы не максимумами ДН друг на друга и коэффициент усиления антенн будет не максимальным, следовательно рассчитанный PL будет выше, чем для ближнего к БС пути;
3. Появляется параметр расстояния между центрами соседних путей. При этом в вертикальной плоскости двухпутный участок считается полностью идентичным однопутному.

На участках любого типа: закрытые(тоннельные)/открытые(наземные) и однопутные/двупутные, располагаются станции метрополитена, которые представляют собой платформу с вестибюлем. В первом приближении предлагается следующая модель **учета влияния станций**.

Предлагается выполнять расчет затухания сигнала так, как будто станция отсутствует, но при частичном совпадении трассы распространения с зоной станции добавлять фиксированную прибавку к затуханию в децибелах. Величина прибавки определяется в результате проведения соответствующих измерений, рассмотренных в разделе 1.6.3 данной главы. Удельные величины дополнительного затухания на станциях открытого и закрытого типа, равные 0,05 дБ/м и 0,1 дБ/м, соответственно. Более подробный анализа данного эффекта приведена в подразделе 2.4.3.

Антенны, установленные на крыше поездов, имеют **задний лепесток ДН**, что позволяет поезду подключаться к БС, когда она находится непосредственно рядом с поездом. Модель (23) поддерживает расчет затухания сигнала при распространении его между антенной на крыше подвижного состава и БС, размещенной непосредственно рядом с составом. Такой случай соответствует перекрытию прямой трассы сигнала собственным составом, когда отсутствует непосредственная прямая видимость между антеннами поезда и БС, а поездная антенна ориентирована на БС задним лепестком диаграммы направленности. Данный случай отличается от обычного расчета затухания следующим:

1. Антенна МС ориентирована задней частью по направлению на антенну БС (+ 180° к обычному направлению);
2. Добавление дополнительно 15 дБ к итоговой величине затухания, что приближенно моделирует перекрытый тоннель.

Величина 15 дБ была определена в результате анализа данных мониторинга RSSI, которые были получены при тестировании сети на линии М4 Петербургского метрополитена.

Также дополнительные потери мощности сигнала могут возникнуть не только из-за геометрических особенностей пространства распространения, но и из-

за экранирования (полной или частичной) пути распространения сигнала движущимися поездами. Такая ситуация может возникать в тоннелях при интенсивном движении, когда расстояние между последовательно движущимися поездами становится меньше, чем расстояние между соседними БС. Эффект экранирования может с большей вероятностью возникать на двупутных участках, когда экранировать могут не только поезда, движущиеся по своему пути, но и поезда противоположного направления. Эффект экранирования возникает, когда антенны БС расположены ниже уровня крыш поездов, на которых установлены поездные антенны. При возникновении полного или частичного экранирования, предполагается, что сигнал полностью затухает при прохождении тела поезда, то есть дополнительные потери будем считать равным бесконечности. Более подробный анализ данного эффекта приведена в подразделе 2.4.4.

1.8 Развитие модели

Среди недостатков модели (23) можно отметить ограниченную точность расчета величины затухания в областях, где подход ГО плохо применим [63, 70, 131, 132, 138]. К этим областям относятся окрестности каустик и окрестности границ геометрической тени для отдельных лучей [16, 20]. Проблема окрестностей каустик была проанализирована выше, и показано, что на данный момент она решается простым ограничением роста мощности выше некоторого порога.

Геометрическое место каустик при первом отражении от вогнутой стены показано на рисунке 5. Желтой точкой показано расположение источника. Построены только лучи, однократно отраженные от стены (падающие лучи также опущены). Точки каустик для различных лучей (они же являются точками пересечения соседних лучей) образуют линию каустики [14, 20]. Каждый луч является касательной к линии каустики в своей точке каустики, поэтому линия каустики является огибающей семейства отраженных лучей. Поле отраженных лучей при этом существует в ограниченной области между стеной и линией каустики. С внешней стороны от линии каустики ГО поле строго равно нулю, а

физическое поле быстро спадает аналогично спаданию на границе свет-тень [15, 28, 56, 60, 61].

Под окрестностями границ геометрической тени для отдельных лучей понимаются области расположения приемника такие, что в текущем алгоритме поиска лучей в ходе трассировки лучей незначительное изменение координаты приемника приводит к исчезновению или появлению найденного луча. Появление или исчезновение достаточно сильного луча может скачком изменить оцененное затухание.

Результаты сравнения разработанной модели с экспериментом, приведенные на рисунках 13–16 отражают оба недостатка. Попадание приемника в окрестность каустики приводит к провалу измеренного затухания относительно предыдущей и последующей точек расположения приемника. Попадание же в окрестность границы тени для сильного луча может приводить к выбросу измеренного затухания вверх. Такие провалы и выбросы наблюдаются в отдельных точках приведенных кривых.

Одним из возможных шагов дальнейшего развития модели затухания сигнала может быть расширение ГО приближения до приближения GTD/UTD для устранения данных недостатков [28, 76, 101, 120, 121]. Уточнение расчетов в окрестностях каустик достигается за счет использования некоторых специальных функций (не выражаемых в элементарных функциях) для зависимости амплитуды поля от координаты вдоль луча в расчетах PL_{GO} . Такие функции в окрестности каустики являются непрерывными (не обращаются в бесконечность), а вне каустик достаточно быстро асимптотически стремятся к ГО формулам.

Уточнение расчетов (23) в окрестности границ тени достигается добавлением лучу возможности распространяться не только по ГО законам, но и огибать выпуклую стену, становясь так называемым ползущим лучом. Пример ползущего луча изображен на рисунке 22. При увеличении длины дуги, пройденной коротковолновым лучом непосредственно по стене, мощность луча очень быстро падает. Дополнительное преимущество, которое дает использование такого подхода в расчете затухания луча, – это плавность перехода состояния, когда он

касается выпуклой стены в одной точке [76, 101, 120, 121]. В ГО подходе данный луч исчезает скачком, проходя точку касания. В GTD/UTD подходе этот переход становится физически сглаженным, и вместо исчезновения луча происходит быстрое, но плавное падение его мощности.

Для количественной оценки данного эффекта ниже приводятся результаты расчетов затухания луча, выполненных нами при исследовании необходимости учета дифракции в разработанной модели затухания, при его распространении вблизи точки касания выпуклой стены с радиусом кривизны 200 м.

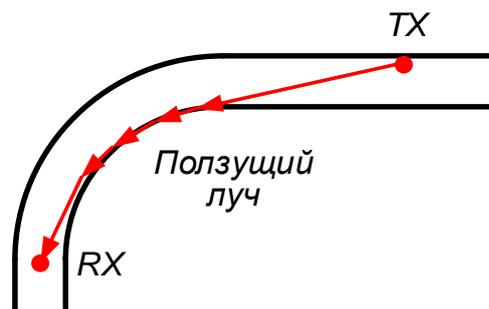


Рисунок 22 – Пример построения ползущего луча

Расчеты приведены для частот 500 МГц, 5 ГГц и 60 ГГц по модели затухания в свободном пространстве (Free space) и по обобщённой теории дифракции (UTD). Передатчик и приемник расположены на равном расстоянии от стены. На рисунке 23 затухание мощности сигнала (Attenuation) в децибелах построено как функция расстояния между приемником и передатчиком по дуге окружности (Arc length) в метрах. Красной линией отмечена точка касания лучом стены.

При ГО расчете до касания лучом стены затухание равно затуханию в свободном пространстве (пунктирная линия), а сразу после точки касания затухание падает в бесконечность [76, 91, 96, 143]. Затухания, точно рассчитанные методом UTD, показаны для сравнения сплошной линией [101, 120]. Как можно видеть, ожидаемая плавность перехода точки касания обеспечивается.

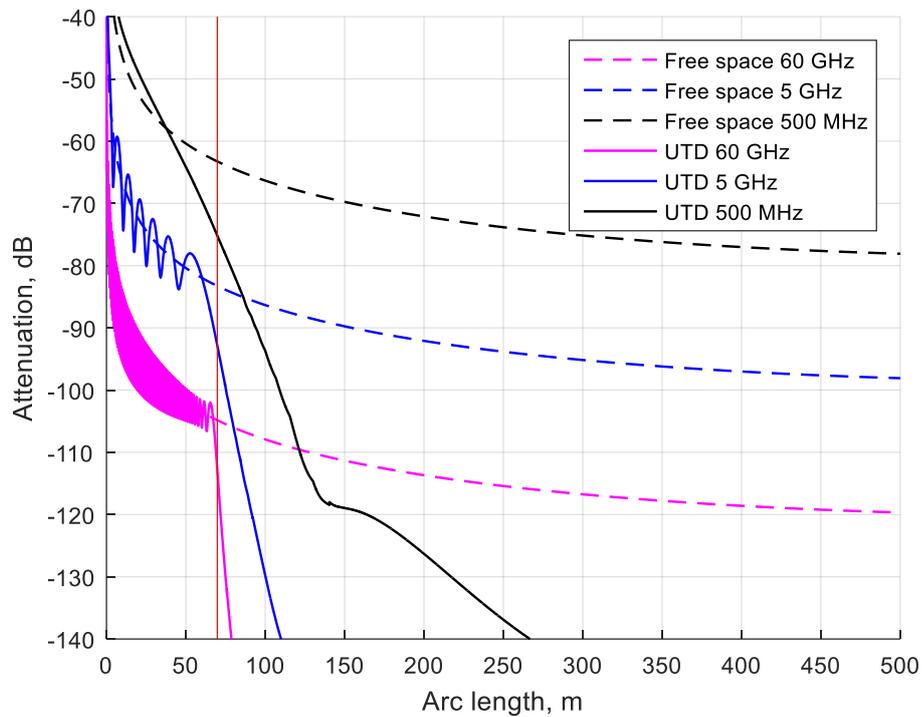


Рисунок 23 – Затухание сигнала при прохождении точки касания выпуклой стены

Также можно отметить, что для 5 ГГц и более высоких частот спадание поля в области геометрической тени даже при GTD/UTD расчетах является достаточно быстрым. По этой причине значительных изменений результатов расчета затухания в модели относительно текущих не ожидается. При более низких же частотах учет ползущих лучей является более существенным.

1.9 Выводы по главе 1

По результатам, приведенным в первой главе, были сделаны следующие выводы:

1. В результате проведенного литературного обзора был выбран подход геометрической оптики для разработки модели затухания сигнала диапазона 5–6 ГГц, так как он обладает достаточной точностью, что, в том числе, подтверждается его широкой распространенностью для моделирования беспроводных каналов;
2. Выработан ряд допущений для упрощения расчетов. Исходная задача распространения сигнала в тоннеле является трехмерной. Для

существенного упрощения расчетов был выработан подход, по которому модель затухания сигнала предполагает независимое проведение расчетов в горизонтальной и вертикальных плоскостях. Для получения окончательной оценки затухания полученные результаты в двух плоскостях комбинируются;

3. Метод трассировки лучей выбран для построения модели затухания сигнала. В данном алгоритме излучение передатчика представляется набором лучей, которые распространяются вдоль тоннеля, отражаясь от стен, до попадания в точку приемника. Для прошедших лучей определяется величина затухания, которая складывается из нескольких величин: затухание по законам ГО, затухание в воздушной среде, затухание вследствие отражений;
4. Разработана специальная модель стен тоннелей метрополитена для расчета слагаемого, характеризующего величину затухания сигнала вследствие отражения от стен;
5. Проведены экспериментальные измерения для определения параметров разрабатываемой модели (коэффициента отражений от стен, удельной проводимости и толщины рассеивающего слоя в слоистой модели стен) и измерению значений уровня затухания сигнала (PL) при распространении вдоль тоннелей метро в условиях тоннелей метрополитена;
6. В результате экспериментальных исследований подобраны величины проводимости эффективного рассеивающего слоя $\sigma = 0,01$ См/м и толщины рассеивающего слоя $d = 60$ см, при использовании которых, рассчитанные значения лучшим образом согласуются с результатами экспериментальных измерений. Данные параметры в рамках разработанной модели могут быть использованы для тоннелей со всеми типами материалов стен;
7. Проведено сравнение затуханий, предсказанных разработанной моделью, и затуханий, измеренных в экспериментальных исследованиях. Результаты сравнения показывают, что в подавляющем большинстве

случаев разница величин укладывается в погрешности измерений. Отсюда можно сделать вывод, что разработанная модель предсказывает величины PL со средней точностью 5 дБ относительно величин, измеренных экспериментально, что является достаточной точностью для применения разработанной модели на практике при проектировании беспроводных сетей на линиях метрополитена;

8. Сформулированы особенности распространения сигнала на открытых и двупутных участках, а также возникновение дополнительных потерь при распространении через станцию, при возникновении эффекта перекрытия;
9. Определены удельные величины дополнительного затухания на станциях открытого и закрытого типа, равные 0,05 дБ/м и 0,1 дБ/м, соответственно;
10. Показано, что учет эффекта дифракции для диапазона 5–6 ГГц не приводит к значительным изменением рассчитанных значений PL, но применение методов обобщенной теории дифракции является возможным направлением дальнейшего развития модели при исследовании других частотных диапазонов.

ГЛАВА 2. АЛГОРИТМЫ РАССТАНОВКИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ И АНАЛИЗА ТРАФИКА ОРГАНИЗОВАННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

Во второй главе приведена разработка и анализ алгоритма расстановки БС (далее по тексту будет также использоваться название – алгоритм радиопланирования) и симулятора беспроводного трафика [66, 84, 85, 103, 106].

Основные результаты, полученные в главе, были опубликованы в статьях [2, 3] и доложены на конференциях [7, 10, 12].

2.1 Вводные замечания

Применения разработанной модели затухания сигнала (23), описанной в главе 1, недостаточно для нахождения оптимальной расстановки БС вдоль линий. БС должны располагаться вдоль линий метрополитена таким образом, чтобы при движении поезда по линии при переключении от одной БС к следующей не возникало ситуаций, когда уровень принимаемого сигнала от БС был ниже некоторого заданного порога. При этом расстановка БС не должна быть избыточной, то есть линии метрополитена должны быть покрыты беспроводной сетью, удовлетворяющей строгим условиям на качество принимаемого сигнала в каждой точке линии, при использовании для развертывания такой сети минимально возможного количества БС.

Решение подобной задачи является основной целью радиопланирования. Для ее решения в условиях, отличных от тоннелей метрополитена, существуют алгоритмы выбора координаты БС, основанные на последовательном расчете величины затухания сигнала между двумя произвольными точками приемопередатчиков БС и МС [72, 74]. В основном, существующие алгоритмы выбора расположения БС применимы для наземных участков или для помещений. Оба приведенных примера сильно отличаются от тоннельных сценариев по характеру поведения сигнала, поэтому возникла необходимость в разработке

отдельного алгоритма расстановки БС, использующего разработанную модель распространения (23).

При этом, использование алгоритма расстановки БС, базирующегося только на разработанной математической модели затухания, как показывает практика, является недостаточным для решения сложной задачи радиопланирования беспроводных сетей в метрополитене. На итоговый уровень покрытия линий метрополитена беспроводной сетью и на качество развернутой сети влияют ряд дополнительных эффектов, которые проявляются в процессе эксплуатации беспроводной сети, но которые не всегда представляется возможным учесть в модели затухания [81, 84, 118, 148]. Соответственно появляется дополнительная задача проверки (верификации), выполняет ли беспроводная сеть условия обеспечения непрерывного доступа в сеть при максимальной скорости передачи данных в условиях реальной эксплуатации [90, 110, 131, 132, 138].

В настоящее время для оценки и анализа производительности развернутых беспроводных сетей используются тесты в реальном времени на подвижном составе [81, 85, 118]. Но стоимость таких тестов становится очень высокой, если тесты нужно повторять много раз, а иногда проводить такие тесты просто не представляется возможным. Альтернативным вариантом является использование симуляторов, моделирующих поведение беспроводного канала связи в процессе движения, для оценки качества итогового уровня радиосигнала [90, 94, 95, 110]. Симуляторы трафика учитывают различные факторы, влияющие на итоговое качество сети: алгоритм хэндовер (правило, по которому происходит переключение МС между БС), параметры беспроводной сети и транспортной сети [90, 106, 110, 148].

Были изучены существующие подходы к разработке симуляторов, решающих аналогичные задачи. В [66, 85, 95, 103] представлены примеры использования симулятора трафика беспроводной сети в условиях реального движения абонентов на железнодорожном транспорте для анализа характеристик образованного беспроводного канала передачи данных и улучшения существующей архитектуры. В [105, 118] рассматривается разработка симулятора

движения поездов в метрополитене для автоматической регуляции параметров движения поездов в условиях высокого пассажиропотока. В [84] освещается одно из важнейших применений симулятора движения транспорта – детектирование и предотвращение столкновений поездов. В [106] исследуется возможность использования симулятора трафика для анализа загруженности транспортных систем наземного и железнодорожного транспорта. В [148] рассматривается разработка трехмерного визуального симулятора движения поездов для обучающих целей.

Из перечисленных примеров можно вынести, что симуляторы моделирования трафика на подвижном транспорте являются важным объектом для исследования способов усовершенствования текущих сетей [90, 110, 131, 132, 138]. Изучив результаты работ многих исследовательских групп [59, 66, 81, 90], стало понятно, что разработка высокоточного симулятора транспортного и сетевого трафика в метрополитене является важной и актуальной задачей, которая напрямую влияет на качество предоставляемых услуг беспроводной связи [2].

Рассмотренные подходы моделирования беспроводного трафика в изученных источниках либо слишком сложны в реализации, либо требуют знания характеристик уровней выше физического беспроводного протокола передачи данных, которые не рассматриваются в данной диссертационной работе, либо направлены на оптимизацию параметров следования и движения подвижных составов, что не подходит для решаемой нами задачи.

Таким образом, разработка симулятора беспроводного трафика, для учета влияния эффектов, не учитываемых моделью затухания, на итоговый уровень покрытия также является актуальной задачей.

2.2 Общие предположения радиопланирования

Синтез алгоритма радиопланирования проведен при следующих предположениях [10, 12]:

1. Установка БС на станциях запрещена;

2. Каждый подвижной состав имеет две антенны – по одной на каждом хвостовом вагоне;
3. Предполагается работа каждого состава большую часть времени на максимальной пропускной способности. Расстановка БС осуществляется таким образом, чтобы затухание сигнала обеспечивало работу максимальной модуляционно-кодовой схемы в режиме с множественными антеннами на передающей и приемной сторонах Multiple Input Multiple Output (MIMO) [52];
4. Для расчета PL при переборе возможных точек установки каждой БС используется разработанная модель затухания (23) [3];
5. При приближении к платформе после прохождения точки установки последней БС перегона состав переключается на антенну хвостового вагона (последний вагон по ходу движения) и, поддерживая связь с последней БС перегона, доезжает до платформы [19]. После остановки состав снова переключается на антенну головного вагона и продолжает работу с первой БС следующего перегона.

2.3 Алгоритм расстановки базовых станций вдоль линий метрополитена

2.3.1 Общие положения

Алгоритм размещения БС использует разработанную модель затухания сигнала (23). При реализации алгоритма в данной работе нами были предложены следующие эвристические условия:

- 1) PL между подвижным составом, который является МС в разрабатываемом алгоритме, и ближайшей БС не должны превышать заданного порога, обозначаемого как PL-порог. PL-порог является фиксированным значением в процессе исполнения алгоритма, зависит только от характеристик используемого оборудования и параметров, которым должна удовлетворять итоговая беспроводная сеть (например, скорость передачи данных, порядок модуляции или

другие). PL-порог может варьироваться если, например, на разных участках линии метрополитена используется разное оборудование БС или ужесточаются требования на параметры итоговой сети, тогда радиопланирование выполняется заново с новым значением PL-порог. PL-порог не зависит от скорости движения поездов.

3. При движении по линии состав подключается к следующей по ходу БС через антенну своего головного вагона. Данное условие проиллюстрировано на рисунке 24. На рисунке значение PL-порог равно 73 дБ (величина потерь мощности сигнала всегда имеют отрицательно значение, но для удобства отображения и использования в алгоритме – будем далее по тексту использовать абсолютное значение потерь), поезда едут справа налево, изображены два подвижных состава.

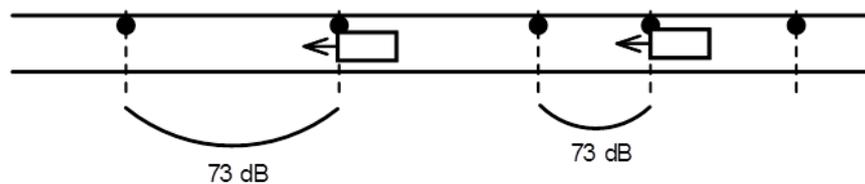


Рисунок 24 – Величина PL между БС и ближайшей БС не должна превышать критического значения PL

4. Для всех подвижных составов следующая по ходу движения поезда БС, к которой поезд подключается при проезде предыдущей БС, расположена на расстоянии, на котором величина PL равна PL-порог. На приведенном примере расстояния между поездами и БС разные, что соответствует разными условиям распространения. Например, участок пути, по которому движется левый поезд, имеет меньший радиус поворота, чем участок, на котором находится правый поезд, что объясняет более быстрое увеличение PL при увеличении расстояния между точками передатчика и приёмника.

5. При приближении к платформе после прохождения точки установки последней БС перегона состав переключается на антенну хвостового вагона (последний вагон по ходу движения) и, поддерживая связь с последней БС

перегона, доезжает до платформы [19]. После остановки состав снова переключается на антенну головного вагона и продолжает работу с первой БС следующего перегона.

6. Алгоритм расстановки БС независимо запускается для каждого перегона линии (перегон – участок линии между двумя последовательными станциями) [19]. Это возможно из-за предположения о переключении состава на хвостовой вагон при подъезде к станции.

Расстановка БС для каждого перегона состоит из двух этапов, называемых далее начальной расстановкой и оптимизацией расстановки БС. На первом этапе БС расставляются так, чтобы затухание сигнала от точки начала перегона (точки конца платформы) до точки установки первой БС и между точками установки соседних БС были равны заданной величине порога. Расстановка выполняется до тех пор, пока не будет достигнут конец перегона (начало платформы следующей станции) [2, 3]. По мере продвижения алгоритма по перегону будут установлены новые БС, для которых должно быть выполнено следующее условие: величина PL между текущей БС и предыдущей (учетом длины поезда) не должно превышать PL -порог. БС, установленная на рассматриваемом перегоне в последнюю очередь, будет далее по тексту называться последней БС. Работу приведенного выше алгоритма можно проиллюстрировать рисунком 25. На перегоне между станциями N и $N+1$ установлено M БС. Также на рисунке 25 отмечены координаты начала и конца перегона (X -начало и X -конец) и направление движения поездов.

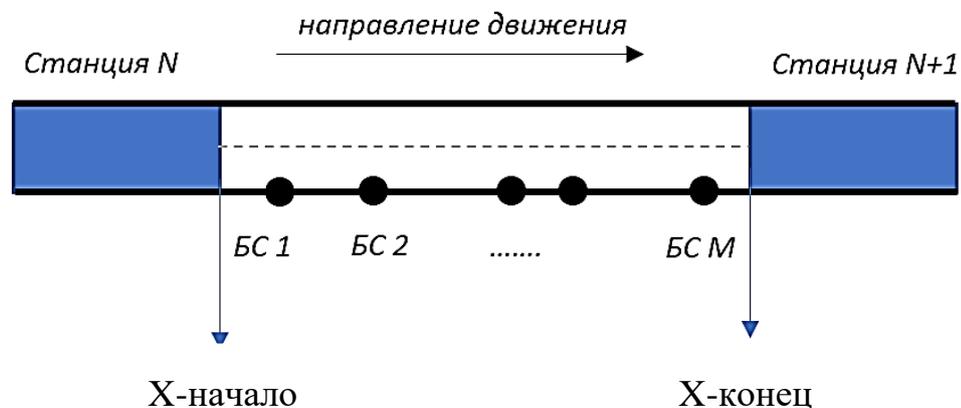


Рисунок 25 – Перегон с установленными БС

В результате начальной расстановки затухание от последней БС до конца перегона является случайным. Примеры, иллюстрирующие неконтролируемость величины PL между последней БС, установленной на перегоне, и концом перегона, более подробно пояснены в следующих разделах. Задачей второго этапа является введение поправок к координатам расставленных БС для выравнивания этого затухания со всеми остальными в данном перегоне. Алгоритм оптимизации допускает также уменьшение количества БС на одну, если после первичной расстановки последняя БС оказалась слишком близко к концу перегона (затухание от нее до конца перегона меньше некоторого критического порога) [2, 3].

Параметрами алгоритма являются: пороговое (критическое) значение затухания PL-порог, координаты начала и конца перегона (будем обозначать X-начало и X-конец, соответственно), величина шага при продвижении вдоль перегона. Все прочие входные параметры, в том числе геометрия тоннеля, входят в алгоритм только опосредованно через вызов функции расчета затухания между двумя произвольными точками тоннеля (23) [2, 3].

Пороговое значение затухания сигнала PL-порог, используемое в алгоритме радиопланирования, задается как:

$$PL\text{-порог} = (P_{TX} - P_{RX}), \quad (25)$$

где P_{TX} – мощность, поданная на вход каждой передающей антенны в дБ,

P_{RX} – мощность, полученной на выходе каждой приемной антенны в дБ.

Требуемая величина порогового затухания PL-порог вычисляется исходя из излучаемой мощности и чувствительности доступного оборудования в требуемом режиме работы [36, 37, 52]. Уровень излучаемой мощности ограничивается максимальной выходной мощностью передатчика, потерями в фидерных трактах и разделением мощности на два направления излучения на БС [130]. Уровень принимаемой мощности вычисляется исходя из целевого значения чувствительности с учетом потерь в фидерных трактах и дополнительной поправки, определяемой необходимым минимальным запасом мощности в

бюджете радиoliniи для преодоления негативного эффекта быстрых и медленных замираний [91]. Стоит отметить, что при разработке модели, напрямую не учитывались дополнительные значения потерь мощности сигнала, связанные с возникновением эффекта многолучевого распространения сигнала, и как следствие, возникновение глубоких замираний. Данный эффект учитывается вводом дополнительной постоянной поправки, которая определяется по результатам измерений и учитывает диапазон изменения PL за счет статистического усреднения замираний. Величина данной поправки составляет 5 дБ. Данная добавка учитывается при пересчете значений чувствительности в PL-порог.

Приведем пример выбора PL-порог. В таблице 5 приведен пример уровней чувствительности для принимающего радио модуля.

Таблица 5 – Пример уровней чувствительности радио модуля

Индекс модуляционно-кодовой схемы	Модуляция (длина информационной последовательности / (длина информационной последовательности + количество проверочных бит на четность))	Скорость передачи данных, Мбит/с	Чувствительность принимающего оборудования, дБм
0	Двоичная фазовая манипуляция (1/2)	0,65	-85
1	Квадратурная фазовая манипуляция (1/2)	1,3	-81
2	Квадратурная фазовая манипуляция (3/4)	1,95	-79
3	16-квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) (1/2)	2,6	-75
4	16-КАМ (3/4)	3,9	-72
5	64-КАМ (2/3)	5,2	-68
6	64-КАМ (3/4)	5,85	-66
7	64-КАМ (5/6)	6,5	-65
8	256-КАМ (3/4)	7,8	-60
9	256-КАМ (5/6)	8,2	-58

Например, если на сеть задано условие обеспечивать скорость передачи данных не ниже 3,9 Мбит/с, по таблице 5, максимальная величина

чувствительности равна -72 дБм. Величина PL-порог для такого случая будет равна 77 дБ, что означает что при значениях PL не выше 77 дБ будут выполнены заданные условия на скорость передачи данных.

2.3.2 Первичная расстановка

Первым этапом является проведение первичной расстановки БС, обеспечивающей бесперебойное соединение состава с БС, но не гарантирующей равенство уровня сигнала на границах областей покрытия соседних БС на всем перегоне.

В процессе выполнения расстановки производится пошаговое продвижение вдоль тоннеля в пределах указанного перегона. На каждом шаге определяется PL от предыдущей БС (или начала перегона) до текущей точки. Для вычисления потерь вызывается функция, реализующая модель затухания сигнала (23). На вход ей подаются две координаты точек вдоль тоннеля, между которыми необходимо вычислить затухание, а также указание, в какой точке находится антенна БС, а в какой – антенна подвижного состава. Результатом является величина затухания в децибелах.

Для устранения случайных ошибок PL и дополнительного сглаживания вычисленных PL выполняется усреднение вычисленных потерь в двух соседних точках сетки. Данный алгоритм проиллюстрирован на рисунке 26. На рисунке 26 введены следующие обозначения: PL(dB) – величина потерь мощности сигнала в децибелах; Distance (m) – расстояние между передатчиком и приёмником в метрах; PLcrit. – пороговое значение затухание; PL(x) – рассчитанные значения PL в точках с шагом 50 метров (первая точка в 0 метрах); mean. PL(x) – усредненное значение PL в точках с шагом 50 метров (первая точка в 25 метрах); BS – точки расположения БС.

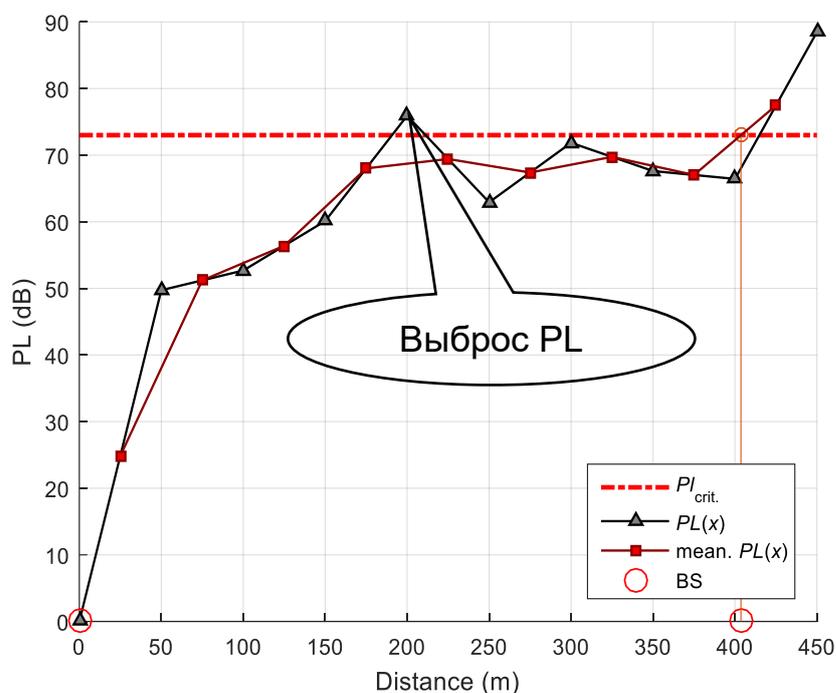


Рисунок 26 – Сглаживание уровня потерь в алгоритме первичной расстановке БС

Пошаговый расчет потерь продолжается до тех пор, пока усредненное значение потерь не будет превышать установленного порогового значения. Когда порог превышен, БС устанавливается в первой точке из пары, по которой выполнялось усреднение. Далее процедура продолжается, новой точкой начала отсчета является координата новой установленной БС. Повторение процедуры будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут конец перегона.

Блок-схема первого этапа расстановки приведена на рисунке 27. На блок-схеме символом f обозначен вызов разработанной модели затухания сигнала для расчета PL между точками (23), обозначенными как входные аргументы функции f .

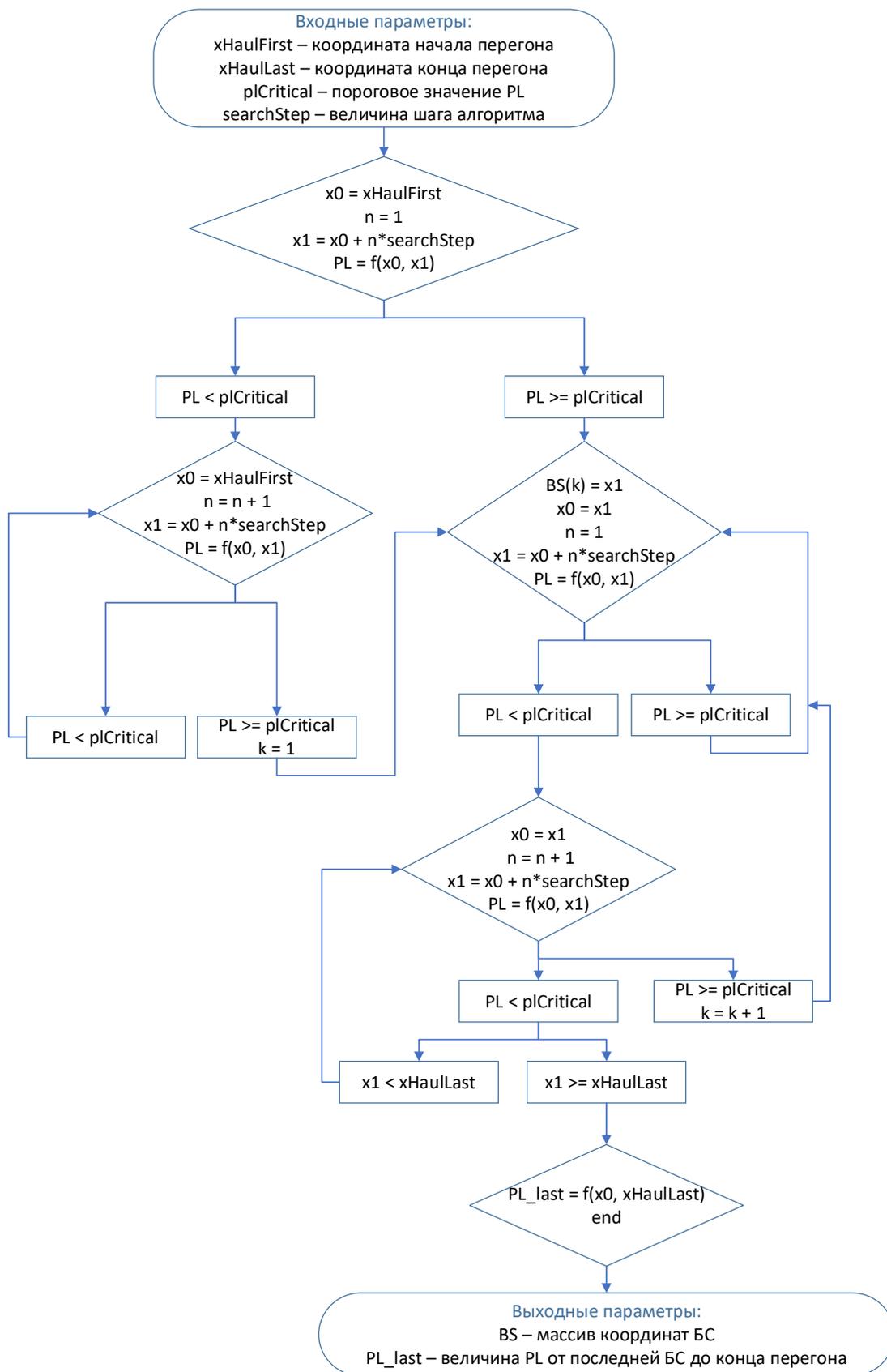


Рисунок 27 – Блок-схема алгоритма первичной расстановки

Графическое отображение кривой PL, полученной в процессе алгоритма для каждой пары точек, представлено на рисунке 28. Точками на графике отмечены значения PL в децибелах при распространении сигнала от ближайшей ранее установленной БС до текущей точки, пунктирной горизонтальной линией отмечен уровень порогового затухания, по оси x точками отмечены места расположения БС, также на рисунке отмечены границы исследуемого перегона.

На рисунке 28 введены следующие обозначения: PL(dB) – величина потерь мощности сигнала в децибелах; Distance (m) – расстояние между передатчиком и приёмником в метрах; PLcrit. – пороговое значение затухание; PL(x) – рассчитанные значения PL; BS – точки расположения БС; Borders of haul – точки, обозначающие границы перегона.

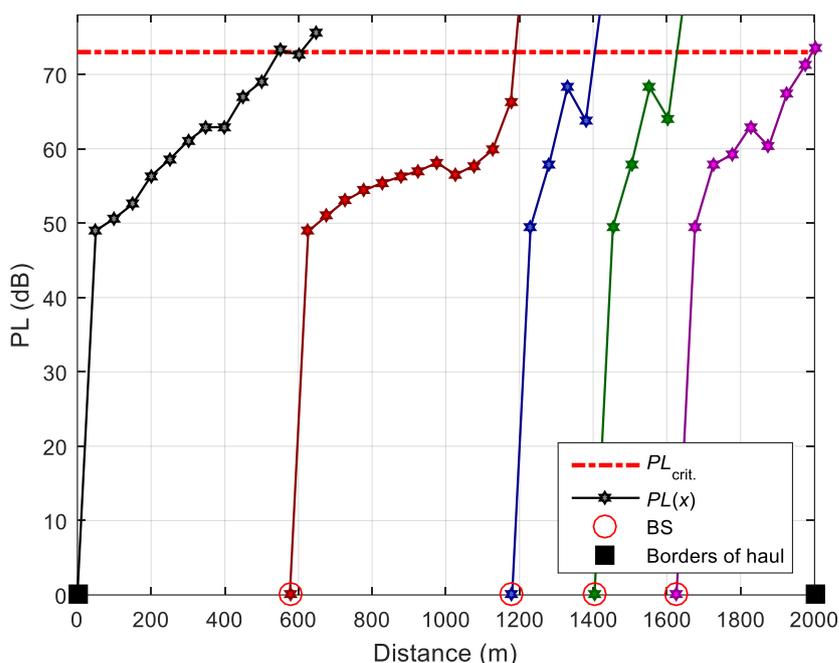


Рисунок 28 – Процедура первичной расстановки

Важным является вопрос выбора шага, так как слишком мелкий шаг существенно увеличит время выполнения расстановки и ухудшит сглаживание случайных ошибок расчета затухания, при слишком большом шаге можно пропустить точку, в которой значение затухания превышает пороговое, и в таком случае координата расположения БС будет определена с большей погрешностью.

Величина шага задается параметром `searchStep` и является внешним параметром алгоритма.

Величина шага выбирались по результатам исследования поведения алгоритма расстановки БС, из ограничений разработанной модели затухания (23) и из анализа результатов полевых тестов по измерению уровня PL между Tx-Rx. Ограничения разработанной модели говорят о том, что шаг не может быть равным единицам метров, так как в том случае изменение PL в десятые доли дБ будет незначительным и сильно меньше погрешности разработанной модели равной 5 дБ. Результаты полевых тестов показали, что на участках тоннеля с малым радиусом поворота или большим уклоном, при расстоянии между Tx и Rx в 150-200 метров, величина PL может достигать порогового значения. Таким образом для выбора значения шага расстановки `searchStep` рассматривался диапазон от 10 до 100 метров с шагом 10 метров. Для выбора шага был проведен анализ на влияние ошибки координат БС, определенных алгоритмом расстановки, и ошибки определения PL между БС в зависимости от величины шага расстановки. Результаты анализа приведены на рисунках 29 и 30. Величины ошибок координат БС и PL построены относительно координат БС и PL при шаге алгоритма расстановки равном 10 м.

На рисунках 29 и 30 приведены результаты для тоннельного и наземного участков. Шаг 10 метров для алгоритма расстановки достаточно мал и замедляет выполнение алгоритма. По результатам анализа был выбран шаг 50 метров, он обеспечивает ошибку PL между БС равную 1 дБ при максимальной неточности расположения БС в 12 метров, что меньше погрешности модели затухания. Важным критерием выбора величины шага алгоритма расстановки является максимизация шага расстановки для минимизации времени расчёта, но при неизменной плотности БС относительно случая с маленьким шагом. То есть чтобы расстановка с большим шагом не приводила к изменению количества БС по сравнению с использованием маленького шага. Шаг в 50 метров не приводит к изменению плотности БС.

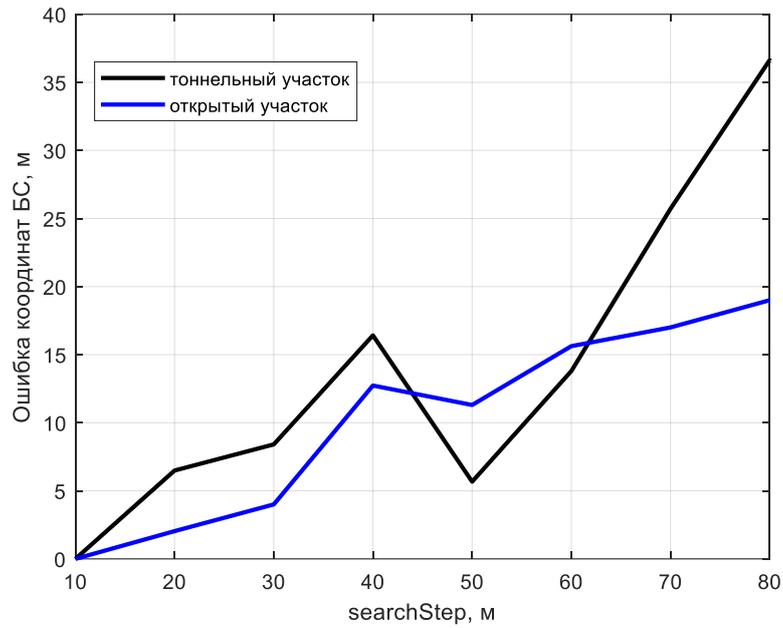


Рисунок 29 – Зависимость ошибки определения координат БС от величины шага расстановки

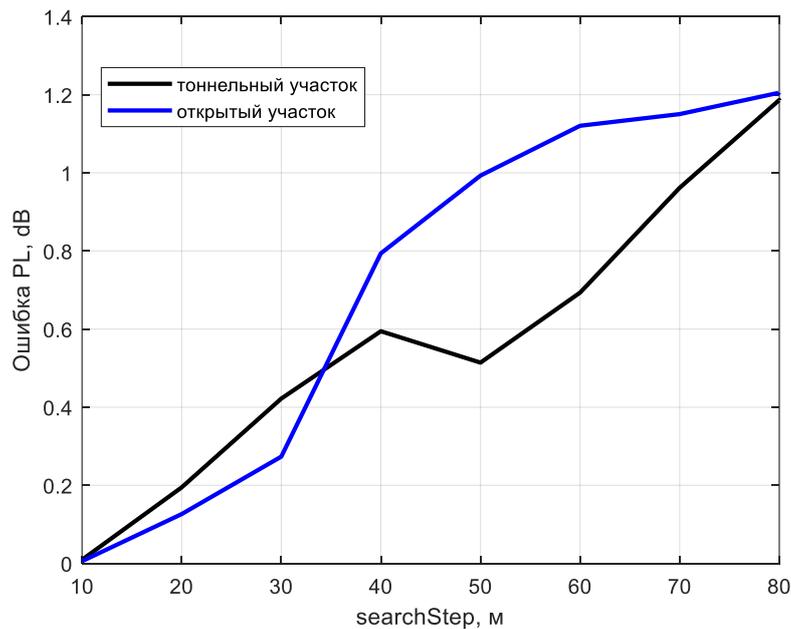


Рисунок 30 – Зависимость ошибки PL между БС от величины шага расстановки

Таким образом, по результатам анализа для практических расчетов был выбран шаг searchStep равный 50 метрам.

2.3.3 Оптимизация координат БС

После получения первичной расстановки БС выполняется процедура оптимизации расстановки, полученной на первом этапе. Задачей этапа оптимизации является обеспечение равномерного уровня покрытия линий метрополитена беспроводной сетью. На этапе первичной расстановки контролируется непрерывность покрытия, но не контролируется равномерность. Под равномерностью покрытия будем понимать обеспечение минимально возможного отклонения величин PL между каждыми двумя последовательными БС (а также PL между началом перегона и первой БС на перегоне, последней БС на перегоне и концом перегона) от среднего уровня перечисленных величин PL. Введем функцию потерь следующим образом:

$$f = \min(\sigma_{PL}) = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^N (PL_i - \text{mean}(PL))^2}{n-1} \right), \quad (26)$$

$$PL_i < plCritical \text{ для всех } i = 1, \dots, N$$

где σ_{PL} – дисперсия массива значений PL, массив PL формируется из: PL между каждыми двумя последовательными БС, началом перегона и первой БС на перегоне, последней БС на перегоне и концом перегона,

$\text{mean}(PL)$ – математическое среднее по массиву PL,

N – общее число величин PL в массиве, равное количеству БС на перегоне + 1.

Процедура оптимизации может идти одним из двух возможных путей. В первом случае оптимизация состоит в сокращении количества БС, полученных после первичной расстановки. Это возможно, если PL между последней БС и концом перегона очень малы, а именно меньше величины maxResidue . В этом случае последняя БС удаляется, а оставшиеся БС перераспределяются в пределах перегона. Иллюстрация величины maxResidue приведена на рисунке 31. Таким образом, сравнение величины PL между последней на перегоне БС и концом

перегона с параметром \maxResidue определяет каким способом будет проходить процедура оптимизации.

На рисунках 31, 33, 34 введены следующие обозначения: $PL(\text{dB})$ – величина потерь мощности сигнала в децибелах; $Distance$ (m) – расстояние между передатчиком и приёмником в метрах; $PL_{crit.}$ – пороговое значение затухание; $PL(x)$ – рассчитанные значения PL ; BS – точки расположения БС; $Borders$ of haul – точки, обозначающие границы перегона; \maxResidue – разность между пороговым значением PL и значением PL от последней БС, установленной на исследуемом перегоне, до конца перегона.

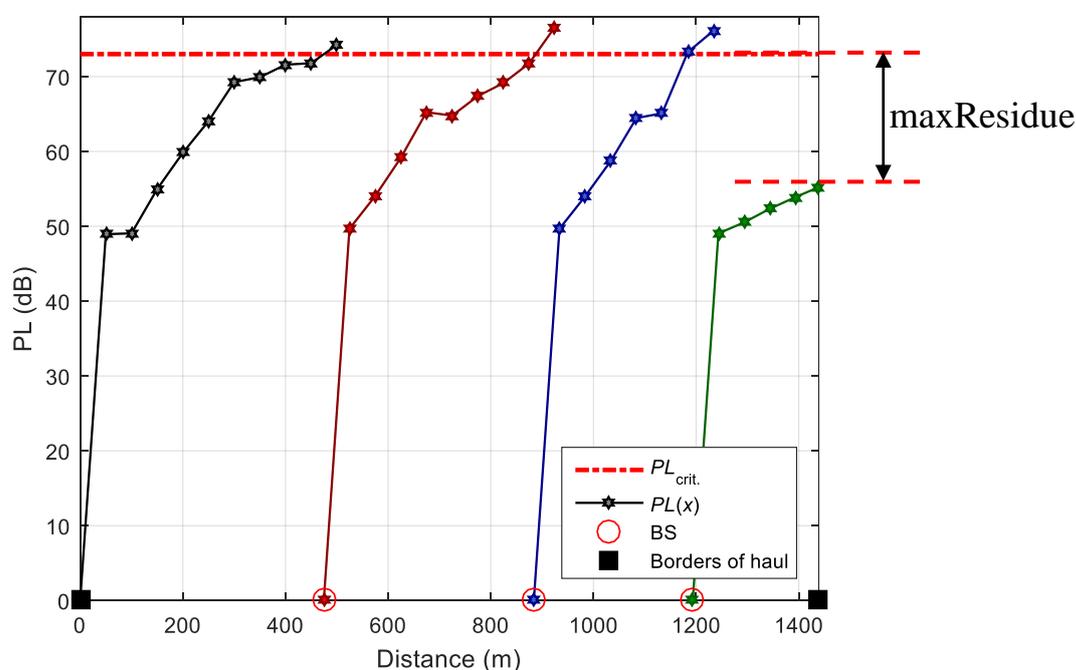


Рисунок 31 – Иллюстрация величины \maxResidue

Во втором случае, если сократить количество БС невозможно, под оптимизацией понимается перераспределение установленных БС для обеспечения наиболее равномерного покрытия. Процедура оптимизации в первом случае производится за счет перемещения БС, оставшихся после удаления последней, к концу перегона, а во втором случае – за счет перемещения БС, установленных в процессе первичной расстановки, в сторону начала перегона.

Расстояние, на которое перемещается БС, прямо пропорционально произведению шага оптимизации $optStep$ и текущей координаты каждой конкретной БС. Экспериментально был выбран шаг оптимизации равный 25 метрам, что составляет половину от величины шага на первом этапе алгоритма расстановки. Разработанная модель (23) является упрощенной, описывает изменение потерь мощности сигнала с точностью 5 дБ (величина определена по результатам сравнения величин, рассчитанных разработанной моделью, и экспериментально измеренных), поэтому малые изменения расположения базовых станций друг относительно друга в единицы метров не дадут значительного изменения в рассчитанное значения затухания.

Более подробно пересчет координат БС происходит по следующим формулам:

$$BS_int = BS - X_{начало}, \quad (27)$$

где BS_int – промежуточные координаты БС относительно начала рассматриваемого перегона,

BS – координаты БС для рассматриваемого перегона, полученные на этапе первичной расстановки,

$X_{начало}$ – координата начала перегона.

$$k = optStep / BS_int (end), \quad (28)$$

где k – коэффициент, определяющий пропорцию смещения БС,

$optStep$ – шаг оптимизации,

$BS_int (end)$ – промежуточная координата последней БС на перегоне.

$$BS_new = BS - sign * k * BS_int, \quad (29)$$

где BS_new – новые промежуточные координаты БС,

$sign$ – параметр, равный 1 при сдвиге БС в сторону конца перегона и равный -1 при сдвиге БС в сторону начала перегона.

$$BS = BS_new + X_{начало}, \quad (30)$$

где BS – новые координаты БС.

Таким образом, оптимизация сводится к поэтапному сжатию или растяжению сетки расставленных БС. По своему смыслу, предложенный алгоритм (29), представляет собой алгоритм градиентного спуска [55], где параметр $sign$ определяет направление спуска, знак «-» перед вторым членом определяет направление антиградиента, коэффициент k , рассчитываемый по формуле (28), определяет величину шага градиента.

После изменения координат БС на каждом шаге оптимизации подсчитываются новые значения потерь между ними. Для сравнения нового результата с предыдущим вариантом вводится метрика равномерности покрытия всего перегона, задаваемая следующей формулой:

$$oprMetric = sign \cdot [mean(PLNew) - borderPL] - std(PLNew), \quad (31)$$

где $optMetric$ – метрика оптимизации,

$PLNew$ – массив новых значений затухания между БС в децибелах,

$borderPL$ – потери между последней БС и концом перегона в децибелах,

$sign$ – параметр, равный 1 при сдвиге БС в сторону конца перегона

и равный -1 при сдвиге БС в сторону начала перегона,

$mean()$ и $std()$ – функции, вычисляющие среднее значение и среднеквадратическое отклонение (стандарт) по заданному вектору соответственно.

Если метрика оказывается отрицательной, то процесс оптимизации заканчивается, и текущий набор координат БС выдается в качестве итоговой

расстановки. Если метрика положительна, то процедура повторяется итеративно до обращения метрики в отрицательную величину. Блок-схема алгоритма оптимизации представлена на рисунке 32.

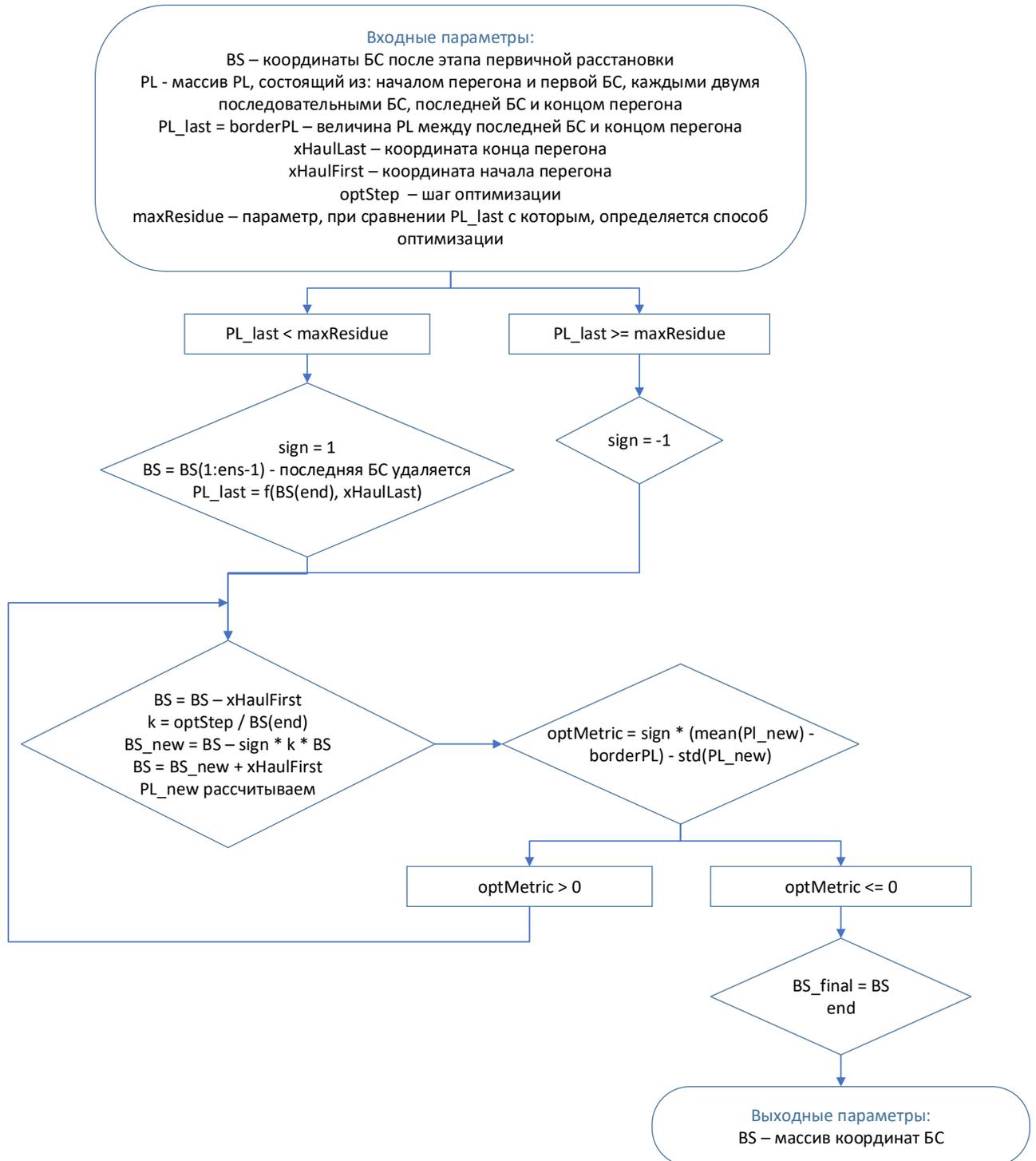


Рисунок 32 – Блок-схема алгоритма оптимизации

Уровни PL до и после процедуры оптимизации расстановки для процедуры оптимизации с удалением последней БС и перемещением всех БС в сторону конца перегона приведены на рисунке 33.

Зависимости уровня потерь до и после оптимизации для случая без удаления последней БС, когда все БС перемещаются в сторону начала перегона, представлены на рисунке 34.

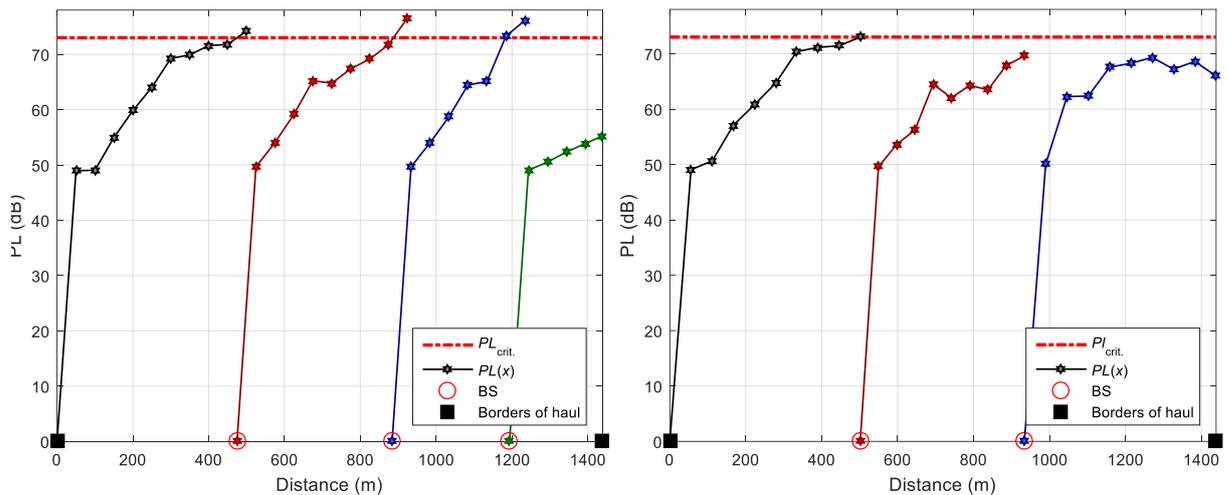


Рисунок 33 – Оптимизации при удалении последней БС на перегоне

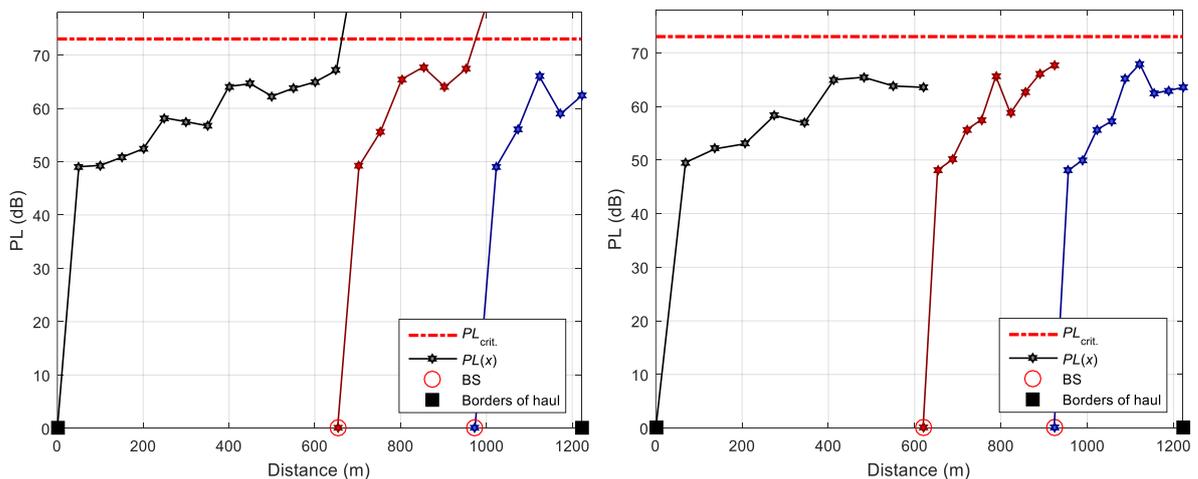


Рисунок 34 – Алгоритм оптимизации при перемещении всех БС в сторону начала перегона

Было также установлено ограничение на количество шагов оптимизации. Если за заданное количество шагов результат расстановки не улучшился,

перераспределение БС считается невозможным, и за итоговый принимается результат первичной расстановки. Ограничение на максимальное количество шагов является необходимым ограничением из-за полимодальности целевой функции (26), обусловленной сильно нелинейным поведением функции расчета PL (23). Стандартным значением на максимальное число итерация было выбрано 50 по результатам численных экспериментов.

2.4 Симулятор беспроводного трафика канала «поезд – базовая станция»

2.4.1 Назначение симулятора

После получения расстановки БС, полученной с помощью разработанного алгоритма оптимальной расстановки, или при анализе существующих сетей необходимо проверить, выполняет ли сеть БС условия обеспечения непрерывного доступа в сеть при максимальной скорости передачи данных в условиях реальной эксплуатации [90, 110, 131, 132, 138]. Для этого был разработан симулятор беспроводного трафика, позволяющий оценить качество работы сети БС и сформировать рекомендации по ее улучшению посредством установки дополнительных БС [38, 52, 91, 130, 143].

Расстановка БС, рассмотренная в пункте 2.3 данной главы, обеспечивает такую расстановку БС, при которой сеть, внутри поезда, в течение всего движения по маршруту удовлетворяет заданным требованиям на скорость передачи данных. В терминах подхода, используемого в данном диссертационном исследовании, требования на скорость передачи данных переводятся в критическое (пороговое) значение PL, которое не должно быть превышено в процессе движения при любом положении поезда (МС) относительно БС. Но алгоритм расстановки БС, не учитывает движение поезда и наличие на линии одновременно нескольких поездов.

Рассмотренная в данной главе модель движения разработана для моделирования движения одного поезда и ансамбля поездов на линиях метрополитена. Реалистичность моделирования движения важна для анализа

частоты переключения поезда между БС, длительности подключения поезда к каждой БС и других параметров, которые влияют на итоговое качество развернутой беспроводной сети. Учет движения и влияния наличия нескольких поездов на линии одновременно, направлено, в том числе, на корректировку расстановки, полученной на выходе алгоритма.

Целью симулятора является доработка расстановки БС (полученной с помощью алгоритма расстановки «с нуля» или существующей на линии ранее) для обеспечения уровня PL не ниже порогового значения в каждый момент движения поезда по линии и минимизация или полное исключение разделения трафика [85, 90, 94, 95].

2.4.2 Модель движения поездов

Первым этапом симулятора является модель движения подвижного состава по линии. Входными параметрами в модели движения поездов являются:

- координаты конца и начала рассматриваемого участка;
- координаты конца и начала станций метрополитена, расположенных на участке;
- координаты установленных БС;
- величина времени стоянки поезда на станции;
- максимальная скорость движения поезда на перегоне;
- ускорение при разгоне;
- ускорение при торможении;
- длина поезда;
- количество рассматриваемых для соединения БС.

В начальный момент отсчета времени головной вагон состава расположен в точке начала пути, заданного во входных параметрах модели. Далее поезд начинает разгоняться до тех пор, пока поездом не будет достигнута максимальная скорость. После разгона начинается интервал движения на максимальной скорости, занимающий большую часть перегона. Затем движение переходит в

равнозамедленное, которое продолжается до полной остановки, когда головной вагон состава выравнивается с координатой конца станции прибытия. После остановки на станции поезд стоит в течение времени, указанного во входных параметрах [19]. При моделировании рассматривается случай максимальной загрузки линии, поэтому значение времени стоянки поезда на станции является минимально возможным для рассматриваемой линии [19]. Данная модель движения используется на всех перегонах линии метрополитена. Модель приведена на рисунке 35 в виде блок-схемы.

Движение каждого поезда считается независимым, модель соответствует движению каждого отдельного поезда, вне зависимости от общего числа одновременно находящихся на линии поездов. В первом предположении величины параметров времени стоянки на станции, максимальной скорости движения, ускорений при разгоне и торможении считаются постоянными.

Основными выходными параметрами модели движения, представленной на блок-схеме рисунка 35, являются массивы координат и скоростей, описывающие изменение координаты и скорости головного вагона подвижного состава при продвижении вдоль линии в каждый момент времени. Шаг между временными отсчетами выбран равным 1 секунде. Таким образом, в выходных массивах содержится динамика изменения координаты поезда и его скорости при посекундном продвижении поезда по маршруту следования.

Так как в данном разделе проведен анализ влияния движения поездов на итоговый уровень покрытия, стоит отметить, что одним из допущений симулятора является пренебрежение эффектом Доплера. Это упрощение справедливо в исследуемых условиях, так как среднюю скорость движения поездов в метрополитене считали равной 50 км/ч (по данным от метрополитена), изменением частоты пренебрегали. Изменение частоты на 0,1 ГГц в разработанной модели соответствует изменению PL на 0,17 дБ, что мало по сравнению с погрешностью модели (23) в 5 дБ.

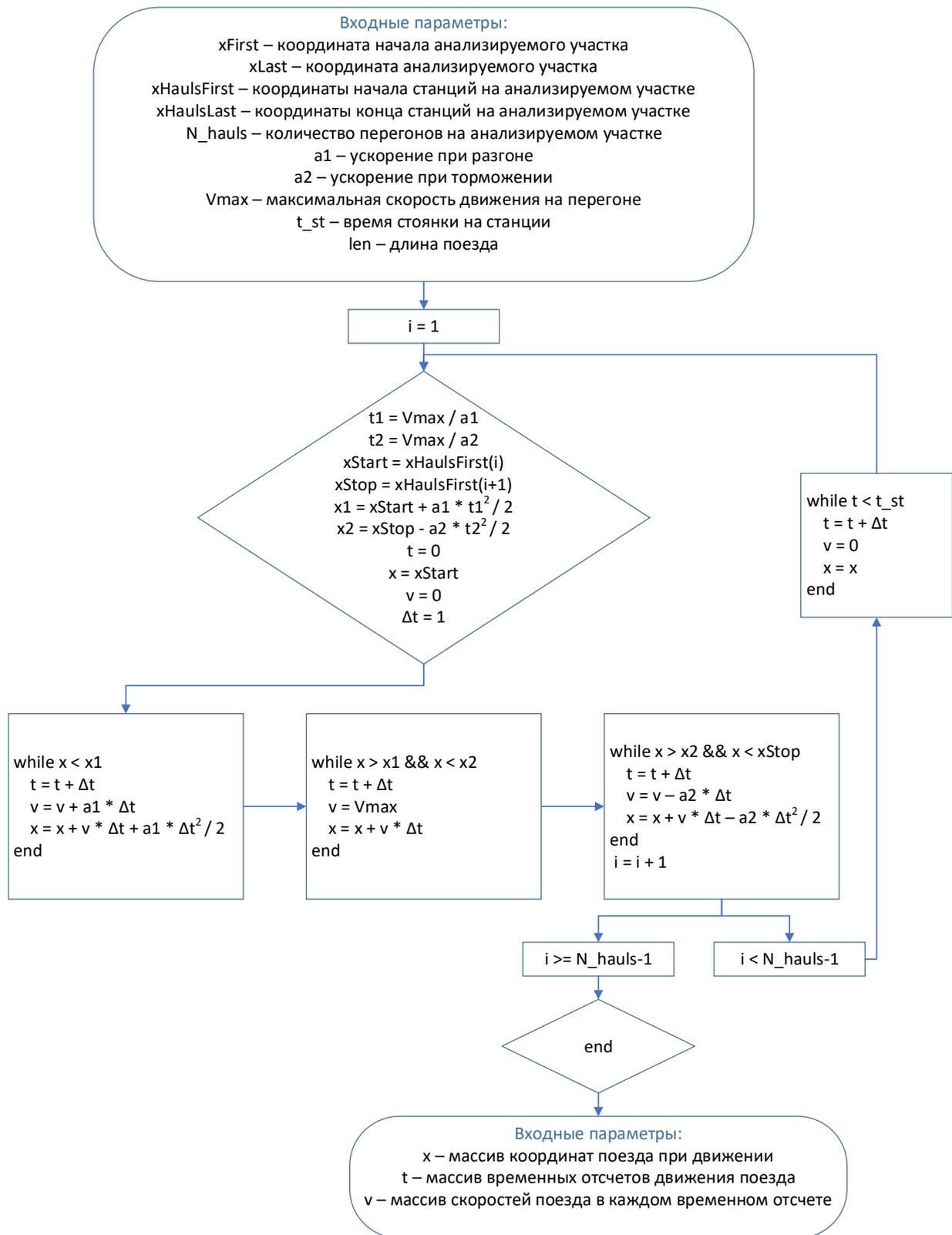


Рисунок 35 – Блок-схема модели движения

2.4.3 Симулятор для одного поезда

С продвижением состава по заданному пути в каждый момент времени находится заданное число ближайших к каждому из конечных вагонов БС. Рассматривать возможность соединения поезда через оба конечных вагона поезда необходимо, так как антенны для подключения к БС установлены на двух хвостовых(конечных) вагонах, благодаря чему обеспечивается стабильность сети Wi-Fi внутри поезда.

Входным параметром на данном этапе симулятора является количество БС, которых состав может рассматривать потенциальными для установления соединения. Пример, приведенный на рисунке 36, иллюстрирует ситуацию, когда данный параметр принят равным 2. Отмечено между какими парами «конечный вагон – БС» будут вычисляться значения PL.

С помощью разработанной функции вычисления потерь (функция, вызывающая разработанную модель затухания сигнала и вычисляющая величину PL по формуле (23)) находятся величины потерь мощности сигнала при распространении от конечных вагонов до соответствующих БС.

На рисунках 36, 37 введены следующие обозначения: PL – величина потерь мощности сигнала в децибелах; xBs_n – точка расположения БС с порядковым номером n.

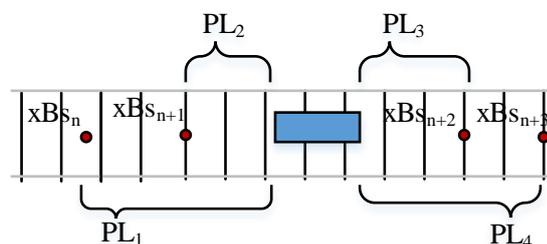


Рисунок 36 – Рассматриваемые поездом БС для подключения

Далее по тексту будут использоваться термины «головной» и «хвостовой» вагоны поезда. Под головным понимается первый вагон поезда по направлению движения, хвостовым – последний вагон. На обоих конечных вагонах устанавливается идентичное оборудование, с технической точки зрения разницы в

них нет, при смене направления движения головной вагон становится хвостовым и наоборот.

При некоторых вариантах взаимного расположения предполагаемого рабочего вагона поезда (вагона, через антенну которого устанавливается соединение) и БС могут возникнуть дополнительные потери. В первую очередь это случай, когда БС перекрывается рассматриваемым поездом. В таком случае соединение с БС может быть установлено через задние лепестки диаграммы направленности антенн. Подобная ситуация изображена на рисунке 37. При наличии перекрытой БС отличие при подсчете PL будет заключаться в том, что величина потерь в этом случае будет определена между этой БС и обоими конечными вагонами поезда.

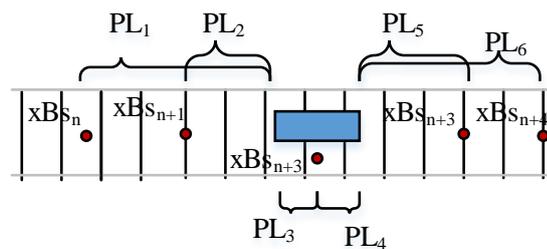


Рисунок 37 – Определение величины потерь сигнала до перекрытой БС

Дополнительные потери появляются если поезд и БС разделены станцией или ее участком [118]. Учет дополнительных потерь на станциях метрополитена различного типа был исследован в разделе 1.6.3. Удельные величины дополнительного затухания равны $\Delta PL = 0,05$ дБ/м и $\Delta PL = 0,1$ дБ/м для открытого и закрытого типа станций, соответственно. Когда БС и поездная антенна разделены станцией или ее частью, сравниваются расстояния разделяющих участков.

Например, если поезд стоит в начале станции метрополитена и подключается через антенну головного вагона к БС, расположенной в тоннеле следующего за станцией перегона, сравниваются расстояния от антенны на поезде до границы станции $\Delta L1$ и от границы станции до БС $\Delta L2$. В случае если первое расстояние больше $\Delta L1 > \Delta L2$, PL рассчитывается с учетом дополнительных удельных потерь

ΔPL на станции, если второе расстояние больше – расчет происходит как для полностью тоннельного участка. Другой пример приведен на рисунке 38.

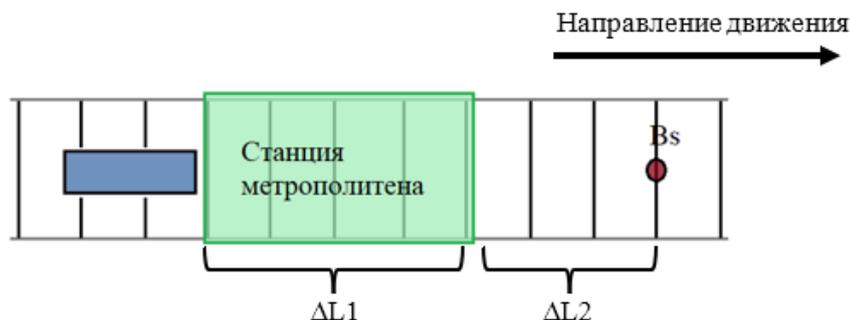


Рисунок 38 – Пример расчета PL при наличии станции между поездом и БС

Приведенный пример можно выразить следующей формулой:

$$\begin{aligned} \text{Если } \Delta L1 \geq \Delta L2: PL &= PL_{model}(\Delta L1 + \Delta L2) + \Delta PL \cdot l; \\ \text{если } \Delta L1 < \Delta L2: PL &= PL_{model}(\Delta L1 + \Delta L2), \end{aligned} \quad (32)$$

где PL_{model} – величина PL, рассчитанная по (23) для расстояния от поезда до БС равного по рисунку 38 ($\Delta L1 + \Delta L2$),

ΔPL – величина дополнительного удельного затухания на станциях ($\Delta PL = 0,05$ дБ/м и $\Delta PL = 0,1$ дБ/м для открытого и закрытого типа станций),

l – длина станции, разделяющей поезд и БС.

Величины PL (23) вычисляются для определения рабочей БС, с которой будет установлено соединение. Выбор рабочей БС происходит на основании используемого в системе алгоритма хэндовер. В простейшем случае используется алгоритм хэндовер при котором поезд подключается к БС, обеспечивающую минимальное значение PL через антенну на одном из своих головных вагонов. Приведенный алгоритм выбора рабочей БС (БС, с которой будет установлено соединение в данный момент времени) и другие характеристики, определяемые на данном этапе моделирования, отображены на блок-схеме на рисунке 39.

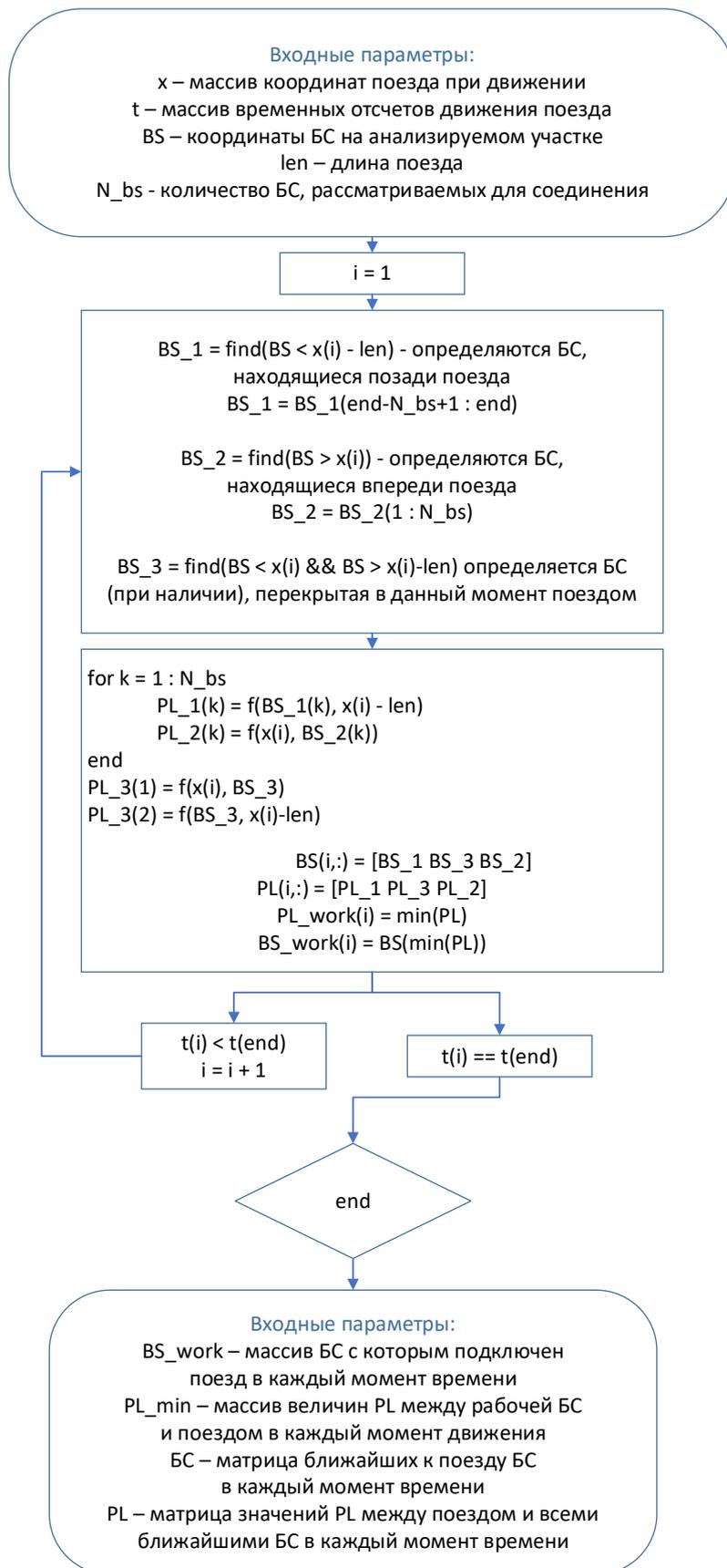


Рисунок 39 – Алгоритм выбора БС для установления соединения

Более реалистичный алгоритм хэндовер, реализуемый в системах «поезд – земля», можно описать следующими этапами. Далее в работе будут использоваться два термина: хэндовер и роуминг. Под роумингом понимается переключение поезда между БС, под хэндовером – переключение между конечными вагонами (то есть через оборудование какого вагона головного или хвостового в данный момент устанавливается связь).

Общие предположения моделирования для учета роуминг / хэндовер:

1. Алгоритм выбора БС при проезде тестового участка составом (выполняется для каждого конца):
 - 1.1. Первоначальное состояние МС – состояние (1), при котором не происходит передача трафика, а происходит детектирование потенциальных БС для соединения. Далее выбирается БС с наилучшим PL (предполагается, что PL измеряется на стороне МС, все БС излучают равную мощность). МС переводится в состояние (2);
 - 1.2. При проезде постоянно выполняется проверка на то, что измеренный PL становится больше настраиваемого порогового уровня (триггера разрыва соединения). Если PL стал больше, то проводится дополнительная проверка на то, что противоположный конец состава не в состоянии (1), то есть не находится в данный момент в процессе роуминг. Если не находится, то выполняется разрыв соединения. Если противоположный конец находится в состоянии (1), то разрыв задерживается до выхода из данного состояния. Здесь предполагаются включенными опции контроля за состоянием противоположного конца и запрета на обратное подключение МС к БС, с которой произошел разрыв соединения;
 - 1.3. После разрыва соединения снова выбирается БС с наилучшим PL, затем МС переходит в состояние (1) на 5 секунд, после чего переходит в состояние (2);
 - 1.4. Процесс повторяется.

2. Параллельно с этим алгоритмом работает хэндовер между концами состава. В каждый момент времени при проезде поезда либо один из двух концов находится в состоянии готовности к передаче трафика, либо оба конца находятся в состоянии готовности. Нахождение обоих концов в (1) невозможно при включении опции контроля состояния противоположного конца. Алгоритм хэндовер в каждый момент времени выбирает либо единственный готовый конец для передачи трафика, либо тот из двух готовых концов, где меньше мгновенный PL. Предполагается мгновенное переключение между концами.

Алгоритмы роуминг и хэндовер проиллюстрированы на рисунке 40.

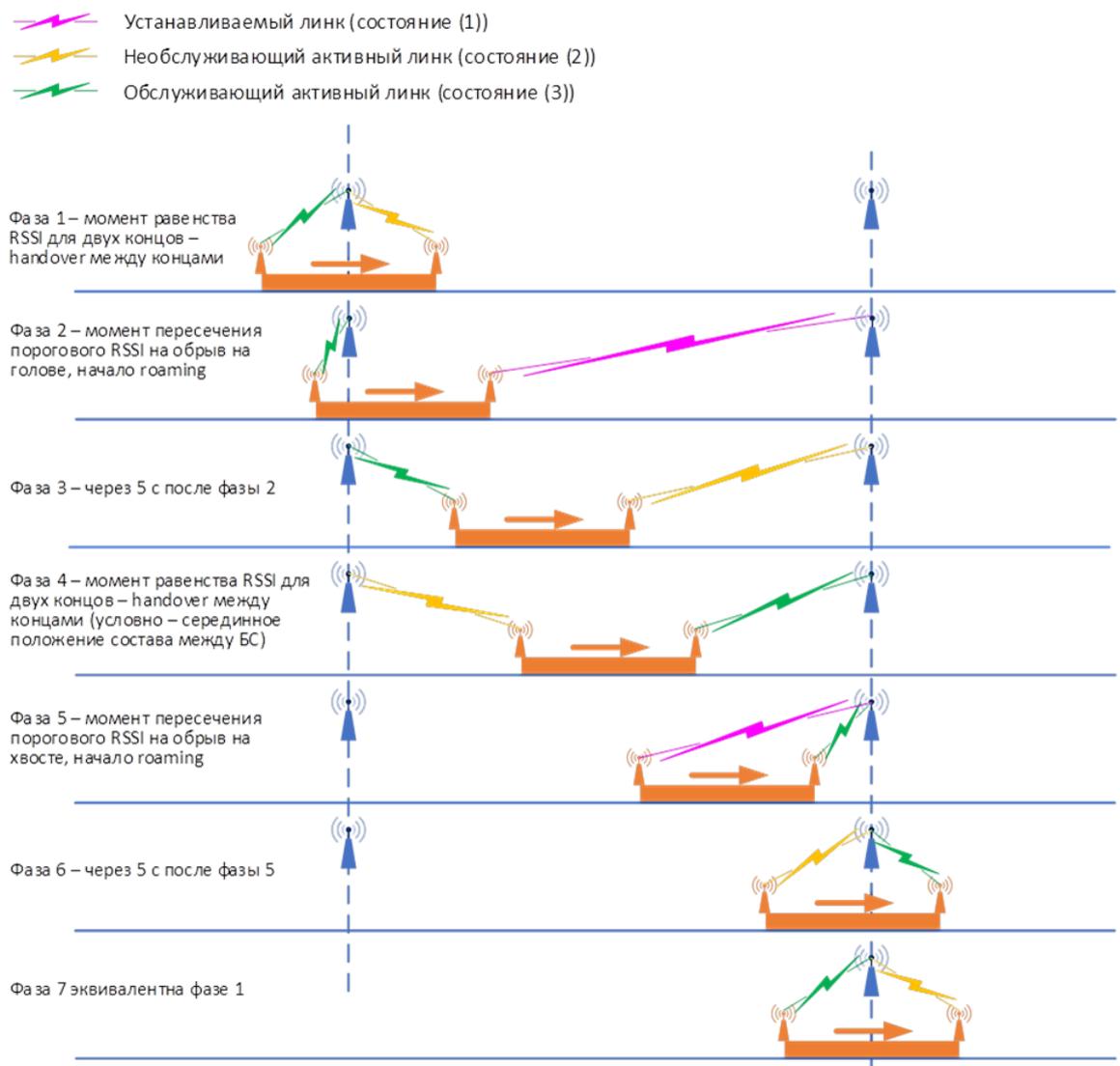


Рисунок 40 – Иллюстрация процесса роуминг / хэндовер

Таким образом, вне зависимости от выбранного алгоритма хэндовер, выходными параметрами данного этапа симулятора беспроводного трафика являются следующие характеристики, определяемые на каждом шаге продвижения поезда вдоль линии: координата и порядковый номер подключенной БС, координата антенны состава (хвостовом или головном), через которую выполняется подключение к выбранной БС, PL между выбранной БС и используемой для подключения антенной поезда. Также выходными параметрами являются массивы, хранящие координаты всех ближайших к поезду БС в каждый момент времени, что проиллюстрировано на рисунке 37, и соответствующие величины PL.

2.4.4 Симулятор для ансамбля поездов

Помимо перечисленных эффектов снижения качества связи из-за возникновения дополнительных потерь, которые могут быть выявлены при моделировании движения одного поезда, есть негативные эффекты, которые могут быть выявлены только при моделировании нескольких поездов, одновременно находящихся на линии, что имеет место в реальной обстановке метро [19].

Для анализа работы всей системы необходимо рассматривать ансамбль поездов. Дополнительными входными параметрами симулятора в случае ансамбля поездов будут:

- временной интервал между поездами на линии N ;
- количество рассматриваемых поездов T .

В данном случае был выбран ансамбль из трех последовательно следующих поездов, что является минимально необходимым для полного анализа работы системы беспроводной связи.

Параметр временного интервала между поездами влияет на вероятность возникновения различных эффектов, которые могут приводить к ухудшению качества соединения поезда с БС или полной потере соединения. В симуляторе используется минимальный временной интервал для каждой конкретной линии,

что соответствует максимальной плотности поездов и максимальной нагрузке сети БС в часы пик.

В реальных условиях критерий максимальной скорости передачи данных может не выполняться из-за наличия на линии одновременно нескольких поездов. Ансамбль поездов необходимо рассматривать для анализа вероятности подключения к БС более одного поезда и возникновения эффекта экранирования. Эти эффекты являются причинами снижения пропускной способности сети из-за разделения трафика данных между одной БС и несколькими поездами.

Основным объектом наблюдения в данном ансамбле является поезд, находящийся в середине, два соседних поезда рассматриваются для анализа вероятности возникновения эффектов экранирования оптимальной БС (той, которая обеспечивает минимальное значение PL) и разделения трафика при переключении нескольких составов к одной БС.

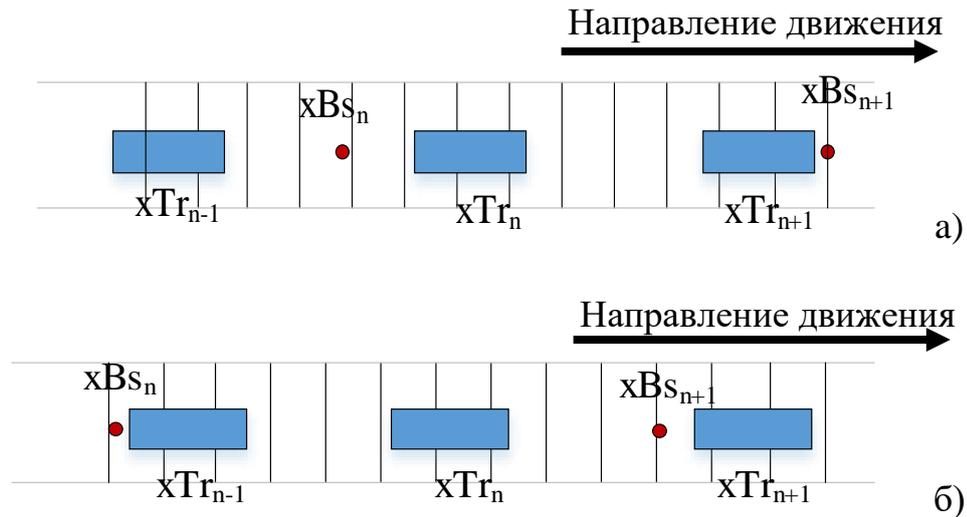
Под ситуацией экранирования понимается ситуация, при которой соседний поезд находится к текущему на таком расстоянии, при котором между ними нет БС. Считаем, что сигнал не может распространяться сквозь поезд, а свободного пространства между телом поезда и пространством тоннеля недостаточно чтобы там распространялся сигнал с сохранением большей части мощности.

Сигнал от антенны на поезде до антенны БС может распространяться в следующих областях: от головного вагона рассматриваемого поезда до хвостового вагона впередиидущего поезда и от хвостового вагона до головного вагона поезда, идущего позади. Экранирование возможно как впередиидущим поездом, тогда недоступными становятся все БС с координатами больше координаты головного вагона, так и последующим поездом, тогда экранируются все ранее пройденные БС. Взаимное расположение поездов и БС, соответствующее случаю экранирования, представлено на рисунке 41.

Расстояние между поездами, при котором возникает эффект экранирования БС, зависит от интенсивности движения на линии (период следования между поездами, время остановки на станции, максимальная скорость движения). После анализа всех линий метрополитена Москвы (14 линий) и Санкт-Петербурга (5

линий), для этих метрополитенов среднее расстояние между поездами, при котором возможно возникновение перекрытия БС, составляет примерно 600 м.

На рисунках 41–46 введены следующие обозначения: xBs_n – точка расположения БС с порядковым номером n , xTr_n – обозначение поезда, движущегося по линии, с порядковым номером n .



а) экранирование впередиидущим поездом; б) экранирование позадиидущим поездом

Рисунок 41 – Варианты экранирование поезда от БС

Для сохранения непрерывности подключения поезда к сети БС, при возникновении экранирования происходит переключение поезда на другой конечный вагон с соответствующей ему БС. При таком переключении может происходить ухудшение уровня сигнала, так как пара «поезд – БС», которые обеспечивали минимальный уровень PL, стали недоступный из-за возникшего экранирования, и в работу перешла следующая по PL пара «поезд – БС» [48].

Если экранирование происходит одновременно с двух сторон, тогда поезд оказывается полностью экранированным от всех БС и доступ к сети становится невозможным. Такая ситуация представлена на рисунке 42 и может наблюдаться при малом расстоянии между поездами.

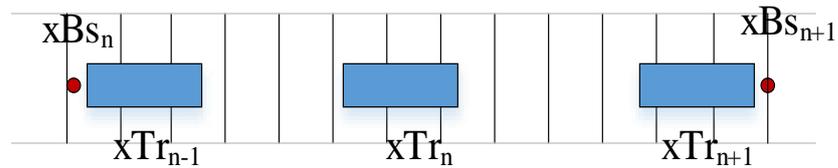


Рисунок 42 – Полное экранирование поезда от БС

Полное экранирование предполагает полную потерю соединения с БС и возникновение участка с отсутствием покрытия сетью.

Значения итогового уровня покрытия некоторого тестового участка линий метрополитена, полученные с помощью разработанного симулятора беспроводного трафика, сравнивались с результатами полевых тестов. Результаты симуляций и полевых тестов приведены на рисунке 43. На приведенном рисунке представлены зависимости величины RSSI, который связан с PL формулой:

$$\text{RSSI} = P_{tx} - \text{PL}, \quad (33)$$

где P_{tx} – мощность передатчика в дБм (децибел милливатт),

PL – величина потерь мощности сигнала по (23) в дБ.

Мощность передатчика считается известной величиной и определяется спецификацией используемого при проведении полевых тестов оборудования, и используется при проведении моделирования.

На рисунке 43 по вертикальной оси отмечено значение RSSI в дБм, по горизонтальной оси – время (проезда поезда) в секундах, цветными сплошными линиями отображены экспериментально измеренные значения RSSI, цветными пунктирными – RSSI, рассчитанные по (33), где PL рассчитано по (23). Разные цвета соответствуют RSSI до разных БС по мере продвижения поезда. Черной сплошной линией отмечен итоговый уровень RSSI на выходе симулятора.

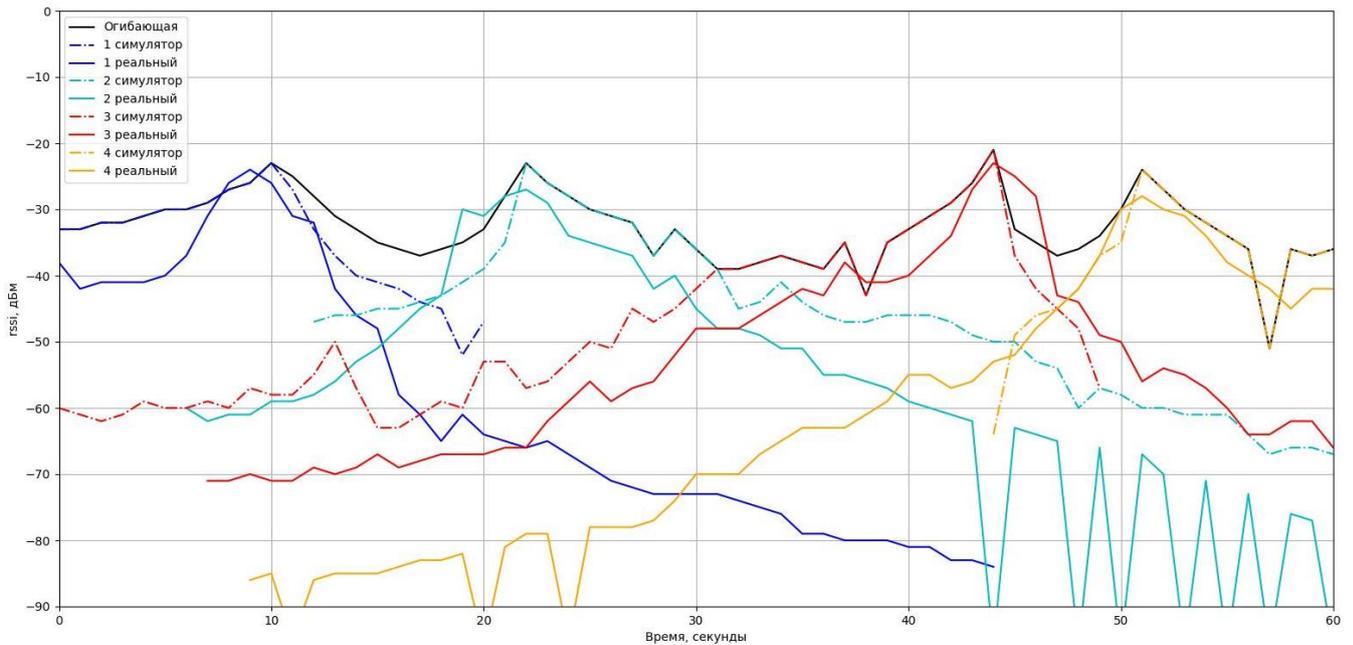


Рисунок 43 – Уровни RSSI, полученные (23) и измеренные экспериментально

Сравнение приведенных кривых показывает, что симулятор беспроводного трафика, внутри которого для расчета PL используется разработанная модель расчета потерь мощности сигнала (23), с достаточной точностью описывают изменение уровня RSSI в рабочем канале «поезд – БС», что говорит о практической применимости разработанного симулятора. Отклонение кривых определяется погрешностью разработанной модели и в среднем равно 5 дБ.

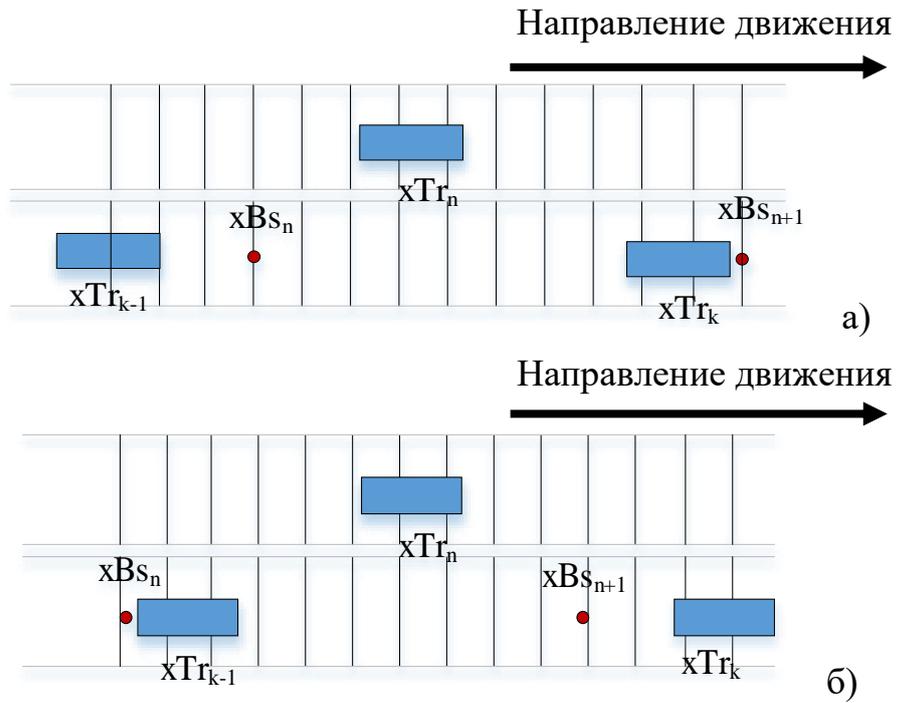
2.4.5 Особенности моделирования различных типов участков

Рассматриваются следующие типы участков: различающиеся количеством путей (самые распространенные типы это однопутные и двухпутные) и различающиеся по характеру области распространения сигнала (подземные участки, то есть тоннели, и наземные, которые будем называть открытыми участками). Также возможны комбинации типов, например: однопутные тоннельные, двухпутные открытые и т. д. В предыдущих разделах второй главы были рассмотрены случаи однопутных участков (тоннельных или открытых), в

текущем разделе остановимся на особенностях моделирования двухпутных участков.

Модель движения каждого поезда в отдельности для двухпутного участка не отличается от модели, предложенной в сценарии однопутных участков. Отличие заключается в том, что существует путь встречного направления, по которому поезд проходит БС в обратном порядке, и координата головного вагона при движении уменьшается. Поезда прямого и встречного направления перемещаются в одной системе координат, где началом является точка с меньшей координатой, концом – точка с большей координатой. При движении по пути прямого направления координата возрастает, по пути противоположного направления движения – уменьшается. В остальном процесс определения рабочего канала и уровня потерь сигнала в нем аналогичен рассмотренному выше алгоритму.

Особенностью двухпутных участков является то, что во многих случаях БС на двухпутных участках устанавливаются только вдоль одного пути. Один из путей является ближним к ряду установленной БС, другой – дальним. В таком случае, отличительной особенностью двухпутных участков от однопутных является возможность возникновения эффекта экранирования двух типов. Первый – перекрытие поездом, находящимся на той же линии, что и рассматриваемый поезд. Такое перекрытие возможно на каждом из двух путей, и анализ на возникновение таких ситуаций происходит независимо для каждого направления способом, рассмотренным ранее. Для пути встречного направления, который будем считать дальним от ряда БС, возможен второй тип перекрытия – перекрытие поездами, находящимися на пути встречного направления, который будем считать ближним к ряду БС. Перекрытие второго типа происходит, когда между рассматриваемым поездом и оптимальной БС расположены поезда встречного направления. Эти поезда экранируют рассматриваемый состав от БС, так как считаются полностью непрозрачными для прохождения радиосигнала, а антенны БС расположены ниже уровня антенн на крыше поезда. На рисунке 44 показано взаимное расположение составов двух путей в ситуациях экранирования БС второго типа.



а) для поезда дальнего от БС пути экранируется БС, расположенная впереди, соединение возможно через хвостовой вагон; б) экранируется БС, расположенная сзади, соединение только через головной вагон

Рисунок 44 – Ситуации экранирования поезда дальнего пути поездам ближнего к БС пути

Как и для однопутных участков, на двухпутных возможно возникновение полного экранирования. На рисунке 45 отображена конфигурация поездов при полном перекрытии. Для двухпутных участков вероятность наступления такой ситуации выше, чем для однопутных.

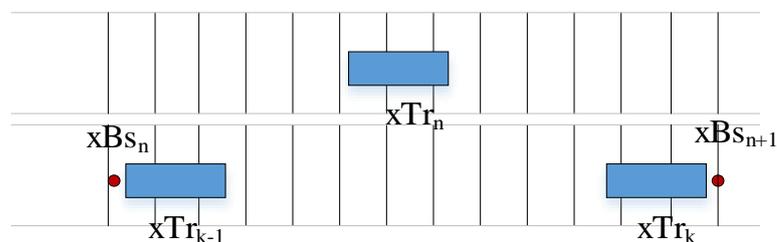


Рисунок 45 – Ситуация полного экранирования поезда дальнего пути поездам ближнего к БС пути

Для анализа второго типа перекрытия на пути встречного направления достаточно рассматривать один поезд, а на пути прямого направления необходимо рассматривать ансамбль из M поездов. Величина M определяется из условия, что на протяжении всего времени движения поезда по пути встречного направления на соседнем пути всегда должны присутствовать поезда. В первом предположении считается, что поезда обоих направлений одновременно выезжают на линию. Это предположение и ансамбль из M поездов, движущихся по противоположному пути, отображен на рисунке 46.

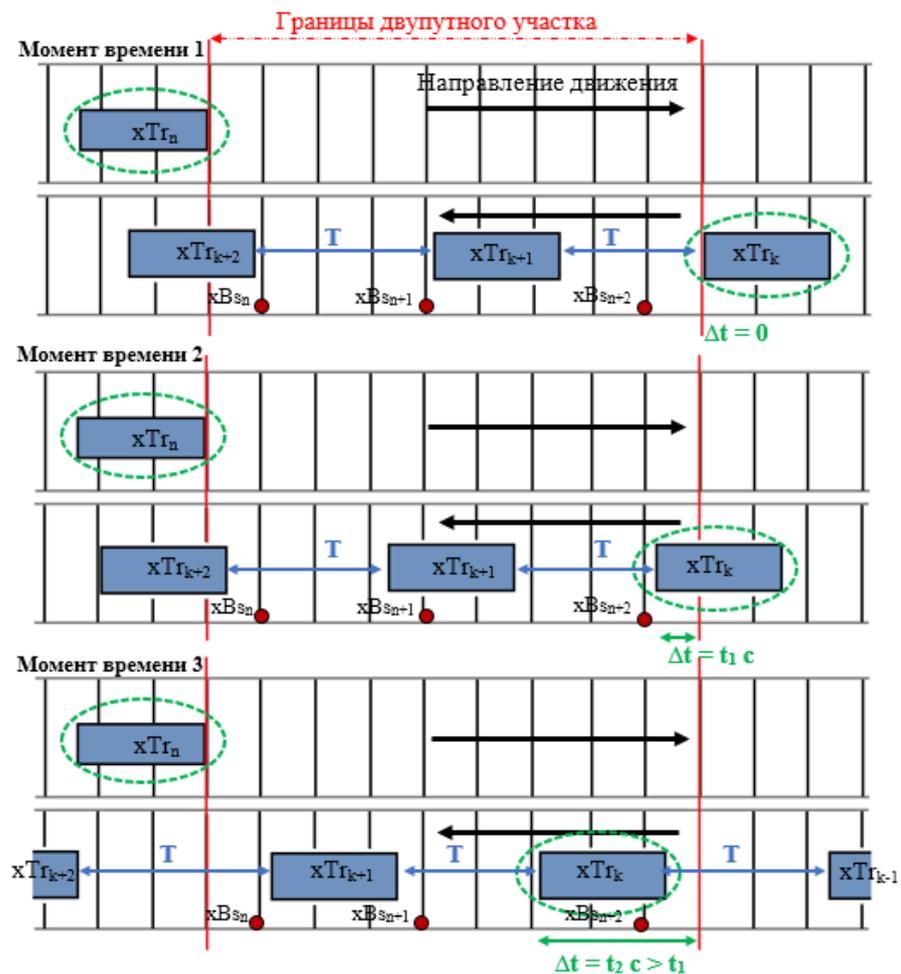


Рисунок 46 – Иллюстрация статистического моделирования возникновения эффектов перекрытия на двухпутном участке

Предположение об одновременности выхода поездов на двухпутный участок, то есть предположение о «синфазности» (под «фазой» в этом случае понимается

разница времен выхода поездов прямого и встречного направления на линию) является частным случаем и может не показать всех случаев перекрытия, возникающих в реальности. Для анализа всех возможных ситуаций перекрытий необходимо перебрать различные варианты разности фаз. При таком переборе будет накоплен набор различных величин разности фаз и соответствующих вероятностей перекрытия (и мест их возникновения), в результате чего можно определить максимальную и среднюю вероятности перекрытия оптимальной БС и наиболее вероятные для возникновения перекрытия участки линии. На рисунке 46 приведены несколько моментов с разными значениями «фаз». На рисунке 46 разность «фаз» между выходами поездов, которые отмечены зеленым пунктиром, на двупутный участок отмечена Δt зеленым цветом. По каждому из путей поезда движутся с разным интервалом, обозначенным T . Величина Δt варьируется от 0 до T . При Δt равном 0 поезда встречных направлений выходят одновременно на линию, величины Δt больше T не рассматриваются, так как после этого ситуация повторяется, по смыслу $\Delta t = 0$ и $\Delta t = T$ равнозначны.

Двупутные участки встречаются и на закрытых (тоннели), и на открытых (наземные участки линий и эстакады) линиях. Но наиболее часто встречаются на открытых участках линий. Дополнительной особенностью открытых участков является более быстрое спадание величины PL при увеличении расстояния между БС и МС из-за отсутствия волноводного эффекта, что приводит к более частому расположению БС. Таким образом, более частое расположение БС приводит к тому, что среднее расстояние между МС и БС меньше, а расстояние между поездами, которое влияет на вероятность возникновения экранирования, не меняется, следовательно вероятность экранирования ниже, чем в тоннельных участках, где расстояние между БС больше.

2.4.6 Характеристики нагрузки БС

Для анализа пропускной способности развернутой сети БС вводятся дополнительные характеристики нагрузки БС:

- максимальная населенность БС;
- средняя населенность БС;
- задействованность во времени каждой отдельной БС.

Максимальная и средняя населенности БС определяют количество одновременно подключенных к одной БС составов. При проектировании сети было заложено предположение о том, что большую часть времени к одной БС должен подключаться один поезд, что соответствует максимальной пропускной способности данной сети. Этот случай соответствует максимальной и средней населенностям БС равным единице.

При использовании текущих предположений о непрохождении сигнала сквозь поезд, максимальное количество одновременно подключенных к одной БС поездов на однопутных закрытых участках равно двум. Это возможно только при расположении поездов по разные стороны от БС, подключение одного поезда происходит через головной состав, другого – через хвостовой. Если значение населенности превышает единицу, это является индикатором временного разделения канала передачи и падения пропускной способности (рисунок 47).

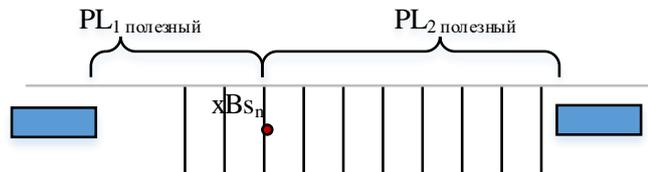


Рисунок 47 – Взаимное расположение двух поездов, подключенных к одной БС

Если к некоторой БС всегда подключен только один поезд, ее средняя и максимальная населенности равны единице. Если к какой-то БС большую часть времени подключен один поезд, но есть временной интервал, в который подключено более одного поезда (какой бы малый интервал не был), тогда максимальная населенность равна этому количеству подключаемых поездов. Средняя населенность в таком случае превышает единицу. Чем более продолжителен данный временной интервал, тем больше средняя населенность превышает единицу.

Под временной задействованностью понимается величина, равная отношению времени, когда к БС был подключен хотя бы один поезд ко времени всего проезда поездом линии. Иными словами, можно сказать, что задействованность конкретной БС равна времени работы БС, но выражается в процентах относительно всего времени пребывания поезда на линии.

Максимальная населенность на двупутном участке равна четырем. Средняя населенность определяется аналогично случаю однопутного участка, но средний уровень будет выше, так как на два пути приходится один ряд БС. Высокое значение средней населенности особенно неблагоприятно на двупутных участках, когда канал может делиться между более чем двумя поездами. Величина задействованности каждой БС на двупутном участке по этой же причине тоже будет выше.

Так как на двупутных участках в симуляторе перебираются все варианты «разности фаз» выхода поездов на участок, средняя и максимальная населенности, задействованность и другие приводимые характеристики получаются усреднением по ансамблю полученных реализаций.

2.5 Выводы по главе 2

По результатам, приведенным в главе, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан итерационный алгоритм оптимальной расстановки БС вдоль линий метро. Под оптимальной понимается такая расстановка, которая обеспечивает непрерывное покрытие участка беспроводной сетью требуемого качества с помощью минимального количества БС. Методика оптимальной расстановки предполагает выполнение двух этапов. Первый этап представляет собой первичную расстановку. На данном этапе обеспечивается бесперебойность соединения состава с БС. Вторым этапом является процесс оптимизации первичной расстановки для обеспечения равномерного покрытия.

2. Критерий оптимизации был выработан в ходе исследования поведения функции расчета потерь сигнала и определен как однопараметрическая функция величин PL между установленными БС. В результате выполнения второго этапа алгоритма расстановки на выходе алгоритма формируется набор координат БС, которые обеспечивают их оптимальную расстановку по требуемым критериям.
3. Разработан симулятор беспроводного трафика, который позволяет проверить, выполняет ли анализируемая сеть БС условия обеспечения непрерывного доступа в сеть при максимальной скорости передачи данных. Критерием является превышение/не превышение критического уровня PL. Для непрерывного беспроводного доступа на максимальной скорости значение PL в течение всего времени движения не должно превышать критического значения. Данный симулятор может быть применен после получения расстановки БС на исследуемом участке «с нуля» или при анализе существующих сетей. В симуляторе заложена модель движения поездов, приближенная к реальной.
4. Симулятор движения учитывает большое число эффектов, имеющих место в реальных условиях метрополитена, которые могут приводить к потере соединения или ухудшения его качества.
5. Разработанный симулятор позволяет определить проблемные места беспроводной сети на линиях метрополитена, где нарушается непрерывность соединения или нарушается один из обязательных критериев. После проведения данного анализа формируются рекомендации по устранению проблемных зон с помощью установки дополнительных БС или перераспределения существующих.

ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ РАДИОПЛАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В третьей главе приведена разработка автоматизированного алгоритма предсказания величины PL, основанного на методах машинного обучения (ML).

Результаты, приведенные в главе 3, опубликованы в статьях [2, 4] и были представлены и обсуждены на научных конференциях [8, 51].

3.1 Вводные замечания

Важным вопросом является оценка времени вычисления разработанных моделей и алгоритмов для решения задачи радиопланирования. Ожидаемым недостатком предлагаемой модели затухания (23), и как следствие алгоритма расстановки и симулятора беспроводного трафика, является значительное время выполнения, которое может составлять, даже при использовании высокопроизводительных вычислительных систем, до нескольких часов. Большое время вычисления является существенным препятствием для развертывания беспроводных сетей на большом количестве участков, а также перепланирования существующих сетей [113, 115, 122, 128].

Для снижения вычислительного времени современным подходом является использование методов машинного обучения (Machine Learning – ML) [41, 49, 65, 83, 113]. В работах разных исследовательских групп изучались различные методы машинного обучения для предсказания величины потерь мощности сигнала (Path Loss – PL) [113, 145] или индикатор уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength Indicator – RSSI) [83, 115, 122] для задач сетевого планирования в городской среде [65, 113, 122, 145] и внутри помещений [83]. Во всех изученных работах процедуры обучения и тестирования выполнялись с помощью набора данных о потерях PL на трассе, созданного на основе результатов моделирования сети, использующей цифровую модель местности [65, 113, 145], или на основе полевых измерений [83, 122].

Примеры зарубежных исследований показывают, что применение методов машинного обучения обеспечивает высокую точность предсказания величин PL или RSSI при планировании беспроводных сетей в городских условиях [65, 71, 124, 125, 128].

Таким образом, задача снижения времени вычислений для решения задач радиопланирования в метрополитене является актуальной [71, 73, 114, 150, 151]. Применение современных методов машинного обучения позволяет существенно сократить время вычисления при сохранении достаточно высокой точности предсказания.

3.2 Выбор алгоритма машинного обучения для предсказания величины потерь мощности сигнала

Термин «машинное обучение» обозначает множество математических методов для разработки алгоритмов, решающих задачу поиска закономерностей между входными и выходными данными [32]. Для исследования возможности применения методов машинного обучения (Machine Learning – ML) для предсказания PL при решении задач радиопланирования были исследованы известные методы ML: линейная и логистическая регрессии, LDA (линейный дискриминантный анализ), дерево решений, K-ближайших соседей, SVM (метод опорных векторов), случайный лес, бустинг (boosting) [25, 41, 49, 55, 102]. Перечисленные методы использовались другими исследовательскими группами при решении схожих задач предсказания PL или RSSI [91] и показали высокую эффективность, поэтому были выбраны как потенциальные для предсказания PL в рамках данного диссертационного исследования

В рамках данной работы исследуется применение методов ML для предсказания PL в тоннелях и открытых участках метрополитена. В [113] исследовались и использовались следующие алгоритмы: метод опорных векторов (Support Vector Regression – SVR), случайный лес (Random Forest – RF) и K-ближайших соседей (K-Nearest Neighbor – KNN). Используемые результаты

моделирования включали в себя оба условия распространения – LOS и NLOS. Результаты показывают, что все оцененные алгоритмы прогнозируют потери на трассе PL с высокой точностью, обеспечивая среднеквадратичные ошибки порядка $2-2,2$ дБ для LOS и $3,4-4,1$ дБ для NLOS, соответственно. В процессе исследований алгоритмов KNN показал наилучшую производительность, таким образом, он является привлекательным вариантом для прогнозирования потерь на трассе в городских условиях [113].

В [83] представляется метод оценки величины PL на основе ML, не использующий модель затухания, а использующий измеренные при эксплуатации сети величины RSSI, зависящие от расстояния, географии и параметров конфигурации БС. Собранные данные используются для обучения классификатора. После сравнения различных алгоритмов машинного обучения результаты показали, что метод опорных векторов (SVM) превосходит другие классификаторы с точки зрения точности прогноза, обеспечивая точность до 86,7% [83].

Все модели машинного обучения разделяются на обучение с учителем и без учителя [32]. В первую категорию входят регрессионные и классификационные модели. В данной работе будут исследоваться и использоваться методы машинного обучения с учителем, которые представляют собой набор математических функций, которые преобразуют входные данные в выходные на основе примеров пар ввода-вывода [25, 32, 41, 55, 102]. Для выбранных методов ML с учителем необходим обучающий набор данных с известным соответствием набор признаков – ответ, в нашем случае это соответствие: геометрические параметры области распространения между двумя точками – величина PL между этими двумя точками.

В регрессионных моделях вывод является вещественным числом. Самый простой регрессионный алгоритм – линейная регрессия – метод, описывающий поведение данных по линейному закону. Задача линейной регрессии заключается в нахождении линии, которая наилучшим образом соответствует данным [32, 41, 102]. Расширения линейной регрессии включают множественную линейную регрессию (например, поиск наиболее подходящей плоскости) и полиномиальную регрессию (например, поиск наиболее подходящей кривой). Часто такой метод не

применима, так как во многих реальных задачах данные описываются нелинейным законом. В таком случае применяют полиномиальную регрессию, в которой можно задавать степень полинома, чтобы более точно предсказывать поведение [41, 49, 55, 102].

В методах классификации выход часто является вещественным числом, определяющий принадлежность к соответствующему классу из ограниченного набора классов, или метку этого класса [25, 32].

Методы регрессии могут применяться и в задачах классификации, в которых вывод является дискретным, но тогда выходные величины имеют смысл вероятности наступления каждого из исходов в ограниченном множестве [41]. При проведении исследований были рассмотрены известные алгоритмы классификации, используемые в машинном обучении [102]: К-ближайших соседей, дерево решений, случайный лес и др.

По своему физическому смыслу задача предсказания PL является регрессионной, так как выходное значение принимает вещественное значение и, строго говоря, не сводится к ограниченному набору значений, а может принимать значения в большом диапазоне значений от 0 дБ до сотен дБ. Но, принимая во внимание значения чувствительности приемного оборудования [89], характеристики приемной и передающей антенн [127, 139] и результаты анализа измерений PL в условиях метрополитена, приведенных в главе 2, можно сделать вывод, что величины PL в рамках задачи радиопланирования, решаемой в данном диссертационном исследовании, принимают значения в ограниченном диапазоне значений от 40 до 120 дБ. Дополнительным предположением является возможность округления выходных значений предсказанных значений PL до целых значений, тогда поставленная задача предсказания PL может быть решена как задача классификации. Погрешность предсказания в данном случае составит 1 дБ.

При исследовании методов решения поставленной задачи предсказания PL между точками Tx и Rx на линиях метрополитена были исследованы оба подхода: решение задачи предсказания PL как задачи регрессии и как задачи классификации.

3.3 Формирование данных для обучения и применения методов машинного обучения

В методах машинного обучения каждый объект характеризуется набором признаков [41]. Исходя из набора признаков и их значений, в соответствие объекту ставится ответ, который может быть меткой одного из набора классов, тогда это задача классификации, или вещественным значением, тогда это задача регрессии [32, 41, 49, 55]. Объектом в решаемой в диссертационном исследовании задаче является процесс затухания радиосигнала при распространении между точками передатчика и приемника вдоль линий метрополитена. Ответом в данной задаче является величина PL между передатчиком и приемником, признаками являются геометрические характеристики области распространения сигнала (цифровой карты пространства). В качестве среды распространения радиосигнала рассматриваются открытые участки и тоннели метрополитена. Предполагается, что тоннель имеет постоянную геометрию поперечного сечения и постоянные электромагнитные характеристики стен вдоль всей области расчета. Ось тоннеля в пространстве задается кривыми в двух перпендикулярных плоскостях: горизонтальной и вертикальной. Вдоль оси линии в каждой плоскости вводится криволинейная координатная ось. Координата каждой точки вдоль оси тоннеля задается в метрах от некоторой условной точки. Также линия разбивается на набор сегментов, каждый из которых имеет следующие характеристики: ширина, высота, радиус поворота в горизонтальной плоскости, длина, направление поворота (лево/право или верх/низ), величина уклона в вертикальной плоскости. При расчете затухания предполагается, что приемник и передатчик имеют фиксированные координаты в поперечном сечении тоннеля, то есть фиксированное смещение относительно оси тоннеля в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Для составлений цифровой карты зоны между фиксированными двумя точками участок между ними покрывается координатной сеткой следующим образом: координата одной из точек (передатчика или приемника) объявляется начальной, далее с выбранным шагом `gridStep` (например, 25 метров) определяются

следующие узлы сетки в сторону второй точки до момента ее превышения. Координата последней точки округляется до узла построенной координатной сетки. Пример построения координатной сетки между точками Tx и Rx приведен на рисунке 48.

В каждом узле полученной координатной сетки определяются следующие параметры: радиус поворота и направление в горизонтальной плоскости, величина уклона и направление уклона в вертикальной плоскости, расстояние между точками передатчика (Tx) и приемника (Rx), параметр типа рассматриваемого участка (тоннельный/наземный участок).

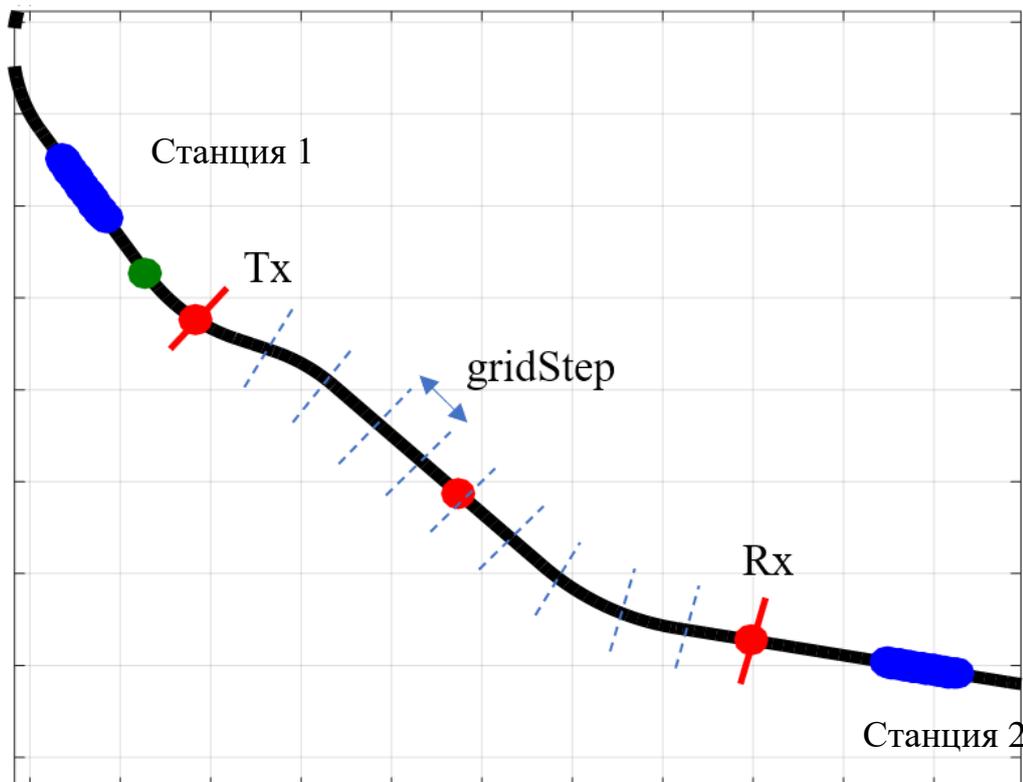


Рисунок 48 – Построение координатной сетки для расчета признаков. Шаг вводимой координатной сетки обозначен – gridStep.

Минимально необходимым набором из рассмотренных выше параметров участка были выбраны следующие метрики:

- уровень потерь мощности (PL) между 2-мя точками;
- расстояния между 2-мя точкам;

- направление поворота пути в точках T_x , R_x в горизонтальной плоскости;
- радиус поворота пути в точках T_x , R_x в горизонтальной плоскости;
- направление уклона пути в точках T_x , R_x в вертикальной плоскости;
- величина уклона пути в точках T_x , R_x в вертикальной плоскости;
- идентификатор типа участка (открытый, закрытый);
- усредненные метрики между точками (направление поворота, радиус поворота, направление уклона, величина уклона).

В качестве дополнительных метрик рассматривались следующие:

- медианные метрики между точками (направление поворота, радиус поворота, направление уклона, величина уклона);
- среднеквадратичные отклонения метрик между точками (направление поворота, радиус поворота, направление уклона, величина уклона) от усредненных значений;
- минимальное значение метрик между точками (направление поворота, радиус поворота, направление уклона, величина уклона);
- максимальное значение метрик между точками (направление поворота, радиус поворота, направление уклона, величина уклона).

Усредненные, медианные, среднеквадратичные, минимальные и максимальные значения находятся по массиву соответствующих метрик, полученных в каждом узле нанесенной на участок сетке.

Для составления набора данных для обучения методов ML, использовалась информация о геометрии линий Москвы и Дели, на которых ранее выполнялась расстановка БС с помощью разработанного комплекса алгоритмов (главы 1, 2) без использования автоматизированного алгоритма. Блок-схема формирования обучающего массива данных приведена на рисунке 49.

Для формирования обучающего набора данных используется информация о геометрии всех линий, на которых ранее была выполнена расстановка БС. При формировании обучающих данных необходимо сформировать пары соответствия параметры геометрии участка между T_x и R_x – величина PL между этой парой T_x и R_x .

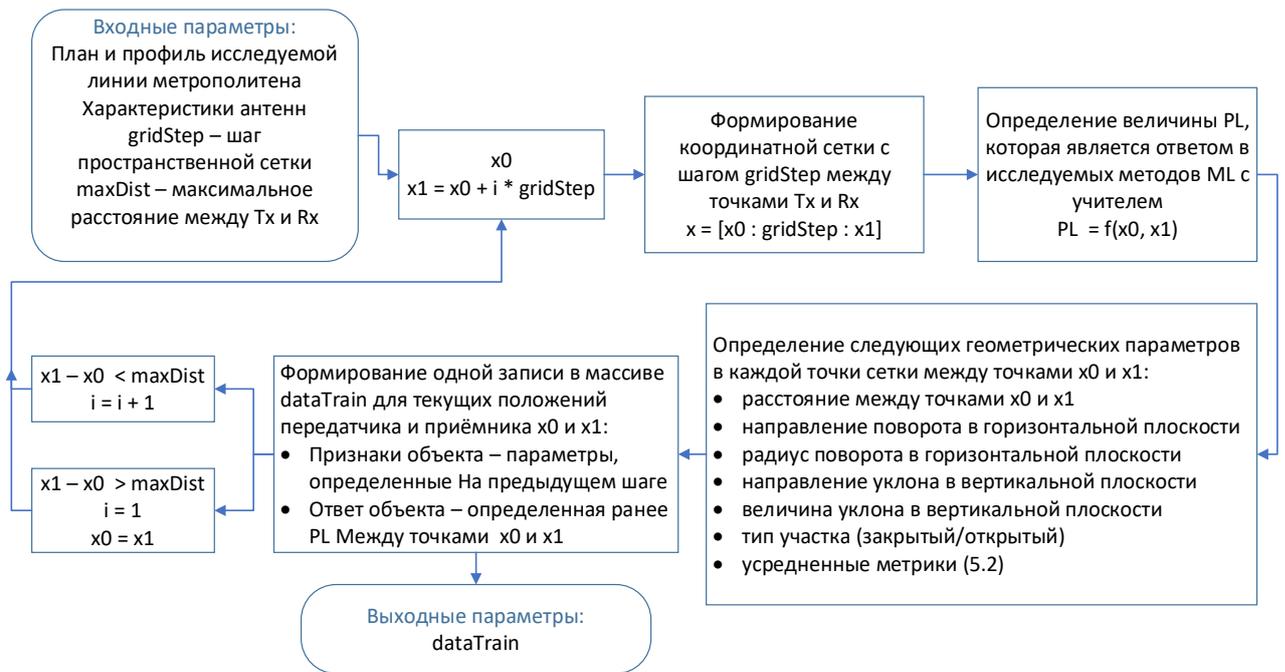


Рисунок 49 – Блок-схема формирования обучающих данных

Для формирования данных в начале линии устанавливается точка Tx, далее точка Rx устанавливается на расстоянии кратном параметру gridStep с последовательным увеличением координаты. Продолжается это до того, пока расстояние между Tx и Rx не будет превышать параметр maxDist, как показано на рисунке 48, затем точка Tx перемещается в точку Rx, которая была на предыдущем шаге, а точка Rx заново последовательно перемещается относительно Tx на все большее расстояние кратное gridStep. Параметр maxDist был выбран равным 1000 метров по результатам исследования затухания PL на линиях метрополитена. Расстояние между БС при усредненных значениях порогового затухания не превышает 1000 метров. Процедура продолжается до конца линии. В течение данной процедуры, при каждом расположении Tx и Rx вычисляется величина PL между ними и рассчитываются параметры геометрии участка между точками. Все найденные величины PL и рассчитанные параметры цифровой карты записываются в обучающий массив. Чем больше записей «признак – ответ» будет содержать обучающая выборка, тем точнее будет предсказываться PL в автоматизированном алгоритме.

3.4 Выбор метода для предсказания PL

Решалась задача предсказания PL выражаемой в децибелах (дБ) в произвольной точке пути по значениям геометрических параметров ее положения.

В первом методе данная задача решалась как задача регрессии, то есть выходными значениями будут вещественные значения PL. Для оценки точности предсказания методов и сравнения их между собой в этом случае использовалась метрика – коэффициент детерминации R^2 , равный отношению дисперсии предсказанных данных к дисперсии исходных данных [49]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (34)$$

где σ^2 – сумма квадратов регрессионных остатков,

σ_y^2 – общая дисперсия,

y_t – фактическое значение предсказываемой переменной (из обучающей выборки),

\hat{y}_t – предсказанное значение переменной,

\bar{y} – среднее значение переменной из обучающей выборки.

Для разумных моделей коэффициент детерминации лежит в пределах от 0 до 1, причем случай $R^2 = 1$ соответствует случаю идеальной модели, $R^2 = 0$ – модель на уровне оптимальной «константной», $R^2 < 0$ – модель хуже «константной» (такие алгоритмы не нужно рассматривать). Оптимальным константным алгоритмом называется такой алгоритм, который всегда возвращает среднее значение ответов для объектов обучающей выборки [32].

Вторым методом является решение задачи предсказания PL как задачи классификации. Многие известные методы ML, рассмотренные ранее в разделе 3.2, подходят для решения задач и регрессии, и классификации. В таком случае для оценки точности моделей и их сравнения используется метрика точности, равная

процентному отношению правильно предсказанных значений относительно всех значений:

$$\text{Точность} = \frac{N}{M}, \quad (35)$$

где N – количество правильно предсказанных ответов,

M – количество всех ответов в выборке.

Блок-схема алгоритма предсказания величины PL по геометрическим характеристиками области распространения представлена на рисунке 50. Блок-схема является универсальной для всех методов ML из анализируемых.

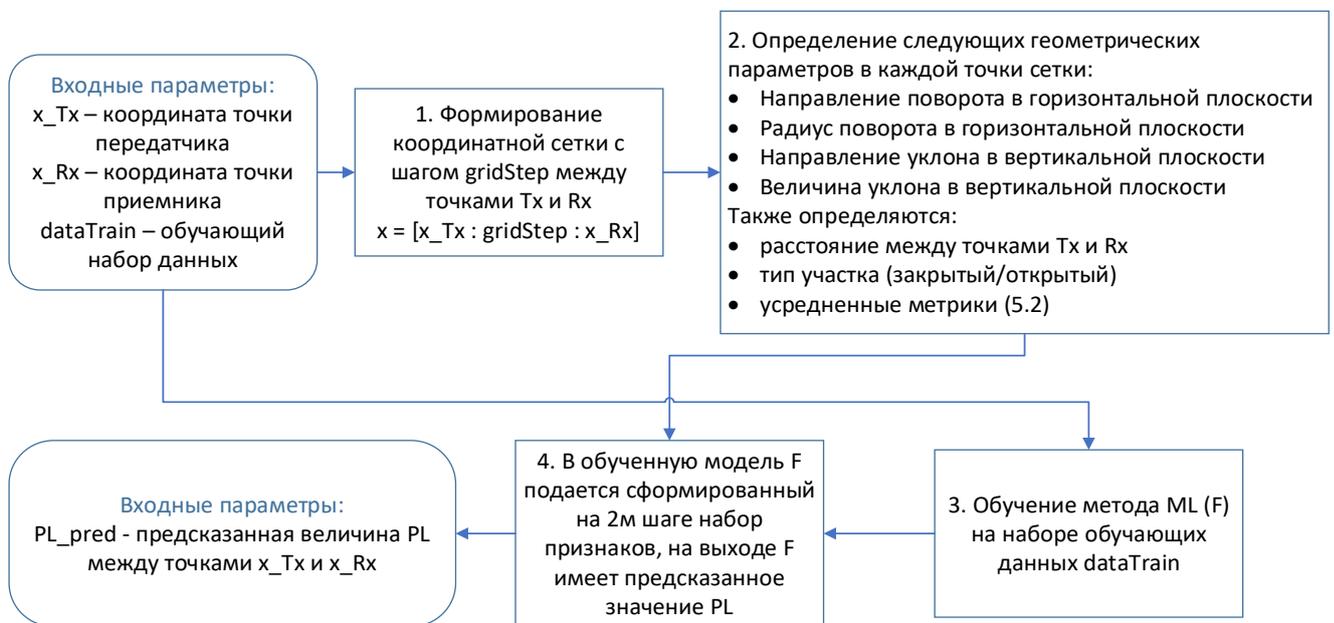


Рисунок 50 – Блок-схема предсказания PL любым методом ML

Результаты применения обоих методов (первый – решение поставленной задачи предсказания PL как задачи регрессии, второй – как классификации) представлены в таблице 6. Для каждого исследуемого метода машинного обучения представлены результаты его применения как для задачи регрессии (метрика для оценки и сравнения – R^2 параметр), так и для задачи классификации (метрика для оценки и сравнения – точность).

Таблица 6 – Сравнение моделей машинного обучения

Метод	R^2 параметр	Точность предсказания
SVM	0,99	0,71
Дерево решение	0,97	0,95
Случайный лес	0,98	0,98
K-ближайших соседей	0,97	0,94
Логистическая регрессия	0,99	0,8

Из таблицы 6 видно, что по значениям метрики R^2 , близкому к 1, можно сделать вывод, что модели хорошо применимы для решения задач регрессии. Но так как значения всех моделей, приведенных в таблице, близки к единице, коэффициент детерминации невозможно использовать для сравнения методов между собой. По значениям метрики точности видно, что модели хорошо применимы для решения задач классификации. Эти выводы подтверждаются графически на рисунке 51.

На рисунке 51 приведены примеры применения двух методов ML: на левом рисунке метод опорных векторов для задачи регрессии (SVM), на правом – случайный лес для задачи классификации. Кривые отображают зависимость PL от расстояния между точками T_x и R_x . На рисунке приведен пример зависимости PL от расстояния для открытого участка линии. Открытые участки линий характеризуются плавным возрастанием значений PL при увеличении расстояния между точкам передатчика и приемника, что характерно для распространения сигнала в свободном пространстве и описывается формулой (1). На рисунке 51 можно заметить отклонение в поведении кривых PL от логарифмического закона при значениях расстояния 800 метров и больше для левого рисунка и 600 метров и больше для правого рисунка, что говорит о том, что рассматриваемый участок не является абсолютно прямым, а присутствует поворот, из-за чего LOS луч попадает не в максимум ДН антенны приемника, или точки T_x и R_x разделены станцией, которая рассеивает сигнал.

На рисунке 51 представлены значения PL, рассчитанные моделью (23) и предсказанные методами ML. Видно, что метод SVM для задачи регрессии предсказывает основной тренд изменения PL, но присутствуют отклонения, а при методе случайного леса обеспечивается точность 0,98 и результаты хорошо согласуются. В результате сравнения методов для предсказания PL был выбран метод классификации – случайный лес.

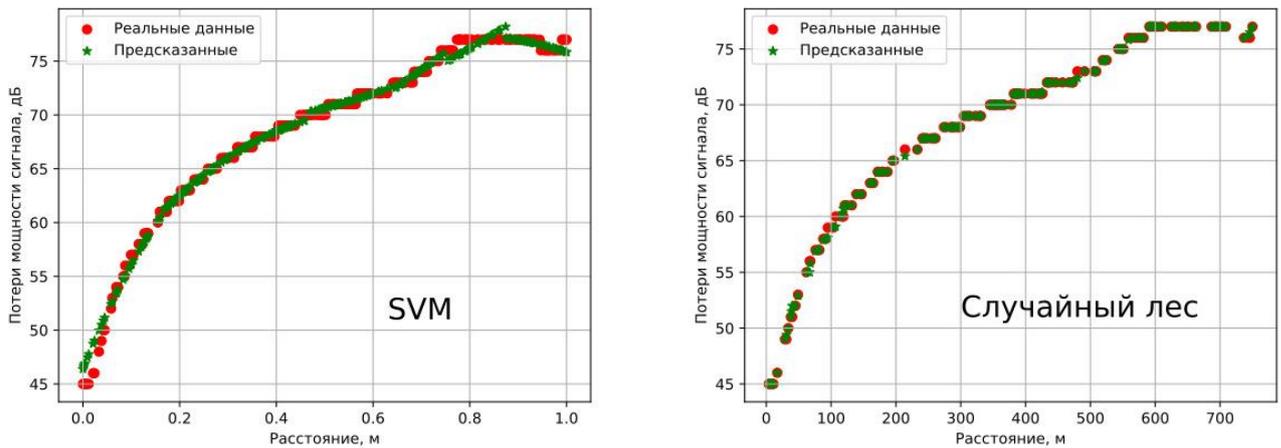


Рисунок 51 – Демонстрация применения двух методов машинного обучения для предсказания величины PL

Таким образом, после анализа современных методов ML, были сделаны следующие выводы. Для предсказания величины затухания мощности сигнала при его распространении между двумя фиксированными точками в тоннеле и на открытых участках метрополитена:

- был выбран метод классификации – случайный лес;
- для использования метода классификации выходные значения предсказанных величин будут являться целыми значениями, то есть выражаться в целых значениях дБ.

3.5 Применение разработанного автоматизированного алгоритма радиопланирования на участках метрополитена разного типа

Расстановка БС состоит из двух этапов, называемых начальной расстановкой и оптимизацией расстановки БС. Расстановка БС на каждом из перегонов линии метрополитена происходит независимо. Алгоритм расстановки представляет собой тот же алгоритм, предложенный в главе 2, но вместо вызова функции расчета PL на основе разработанной модели затухания по формуле (23), вызывается обученный метод ML (по результатам анализа был выбран метод случайного леса) для предсказания величины PL.

Примеры итоговых расстановок БС на перегонах разного типа с помощью выбранного метода машинного обучения представлены на рисунках 52 и 53. Каждая точка на кривых – величина PL между соседней БС с меньшей координатой (черные жирные точки на рисунках) и точной с текущей координатой. На рисунках приведены примеры полученных кривых PL для одного закрытого (тоннельного) перегона на линии метрополитена и одного открытого перегона.

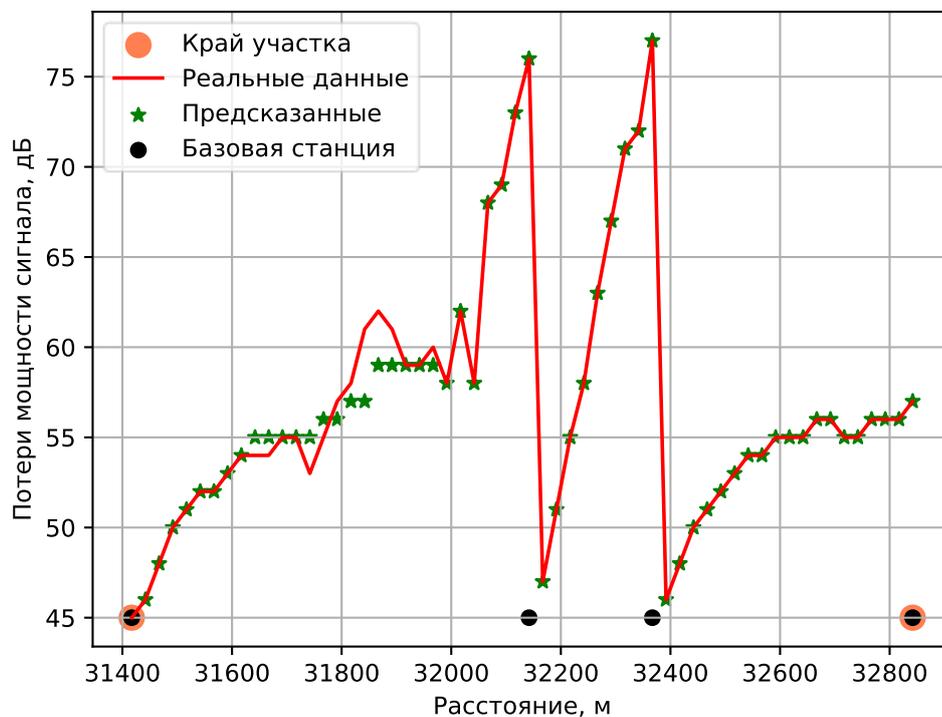


Рисунок 52 – Применение разработанного алгоритма на тоннельном участке

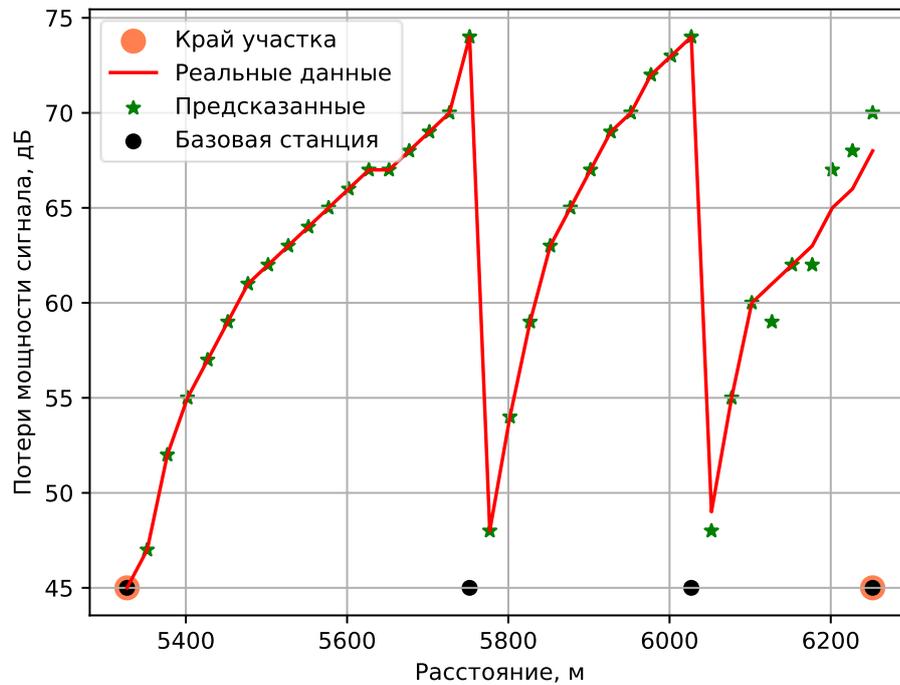


Рисунок 53 – Применение разработанного алгоритма на открытом участке

Численные значения погрешностей разработанного алгоритма приведена в таблице 7 и показывает, что разработанный алгоритм характеризуется высокой точностью предсказания PL, то есть небольшим отличием (погрешностью) предсказанных значений PL от значений, рассчитанных с помощью модели затухания (23), при существенном снижении времени выполнения.

Таблица 7 – Численные значения погрешностей разработанного алгоритма

Параметр	Значение погрешностей
Погрешность предсказания PL (тоннельный сценарий)	$\pm 1,9$ дБ
Погрешность предсказания PL (наземный сценарий)	$\pm 0,3$ дБ
Погрешность определения координат БС (тоннельный сценарий)	± 107 м
Погрешность определения координат БС (наземный сценарий)	± 75 м
Погрешность плотности БС (тоннельный сценарий)	$\pm 0,5$ БС/км
Погрешность плотности БС (наземный сценарий)	$\pm 0,3$ БС/км

В таблице под погрешностями понимается отклонение величин, полученных с помощью автоматизированного средства предсказания PL, от значений PL, полученных с помощью разработанной модели затухания (модели затухания) по формуле (23).

По значениям, приведенным в таблице 7, видно, что применение выбранного метода машинного обучения дает высокую точность предсказания величин PL. Точность предсказания на открытых участках в 6 раз выше, чем в тоннелях, что является следствием более простого и предсказуемого поведения PL при затухании сигнала на открытых участках. Но и результаты предсказания для закрытого участка характеризуются высокой точностью – погрешность предсказания равна 2 дБ.

3.6 Анализ сокращения времени выполнения радиопланирования при использовании автоматизированного алгоритма предсказания PL

Основная задача, решаемая автоматизированным алгоритмом предсказания PL, является сокращение времени выполнения алгоритма расстановки БС и симулятора трафика. Исходный комплекс для решения задачи радиопланирования в метрополитене, состоящий из модели затухания сигнала, алгоритма расстановки БС и симулятора беспроводного трафика, реализован с помощью пакета Matlab, что не является оптимальным с точки зрения временных затрат. Одним из направлений дальнейшей разработки может быть реализация разработанных моделей и алгоритмов на языке программирования C для ускорения вычислений.

В текущей реализации алгоритмов радиопланирования, исходный алгоритм расстановки БС, многократно вызывающий внутри себя модель затухания сигнала (23), на расстановку БС на одном закрытом перегоне линии метрополитена тратил около 1 часа. Разработанный автоматизированный алгоритм, использующий метод машинного обучения, сократил время выполнения до 1 минуты.

В таблице 8 приведены значения времени расчета величины PL с помощью разработанной модели затухания сигнала (23) и значения времени предсказания

величины PL с помощью разработанного автоматизированного алгоритма. В таблице 8 приведены значения для открытых (наземных) и для закрытых (тоннельных) типов участка. При оценке времени предсказания PL методами машинного обучения рассматривались и метод классификации (случайный лес), и метод регрессии (SVM). Значения времен приведено в зависимости от расстояния между точками передатчика и приёмника. Графическая иллюстрация значений из таблицы 8 приведена на рисунках 54 и 55.

Таблица 8 – Время расчета и предсказания PL в зависимости от расстояния

Расстояние между Tx и Tx	Время предсказания PL, с		Время обучения, с		Время расчета функцией PL, с	
	Как классификатор	Как регрессия	Классификатор	Регрессор	Открытый участок	Закрытый участок
10	0,002	0,002	70	45	0,006	7
50	0,002	0,002	74	47	0,004	8
100	0,003	0,001	72	45	0,006	7
150	0,003	0,001	73	45	0,006	26
200	0,002	0,002	70	45	0,005	24
250	0,002	0,001	73	45	0,007	24
300	0,003	0,001	71	45	0,007	24
350	0,003	0,002	74	46	0,006	52
400	0,002	0,002	71	45	0,008	61
450	0,002	0,002	77	45	0,005	53
500	0,003	0,001	72	45	0,008	53
550	0,003	0,001	79	44	0,007	49
600	0,003	0,001	69	44	0,008	124
650	0,003	0,001	72	44	0,007	88
700	0,003	0,001	71	45	0,008	123

750	0,003	0,002	74	44	0,007	316
800	0,002	0,002	72	45	0,007	325
850	0,003	0,001	71	45	0,007	322
900	0,002	0,001	75	45	0,007	321
950	0,003	0,002	74	44	0,009	322
1000	0,003	0,001	72	45	0,006	334



Рисунок 54 – Время расчета и предсказания PL в зависимости от расстояния между Tx-Rx с учетом времени обучения

По приведенным на рисунке 54 значениям, видно, что время расчета PL по разработанной модели затухания (23) для тоннельного участка нелинейно увеличивается с увеличением расстояния между передатчиком и приёмником. Также видно, что время расчета PL по (23) для открытого участка, которое в этом случае сводится к (1), минимально среди всех вариантов, если в автоматизированном алгоритме учитывается время на обучение выбранного метода машинного обучения. Но время на обучение затрачивается только один раз перед запуском алгоритма расстановки и симулятора трафика на заданном участке метрополитена.

В таком случае время предсказания PL сильно меньше времени расчета PL по (23) как для открытого, так и для закрытого участков, что отображено на рисунке 55.

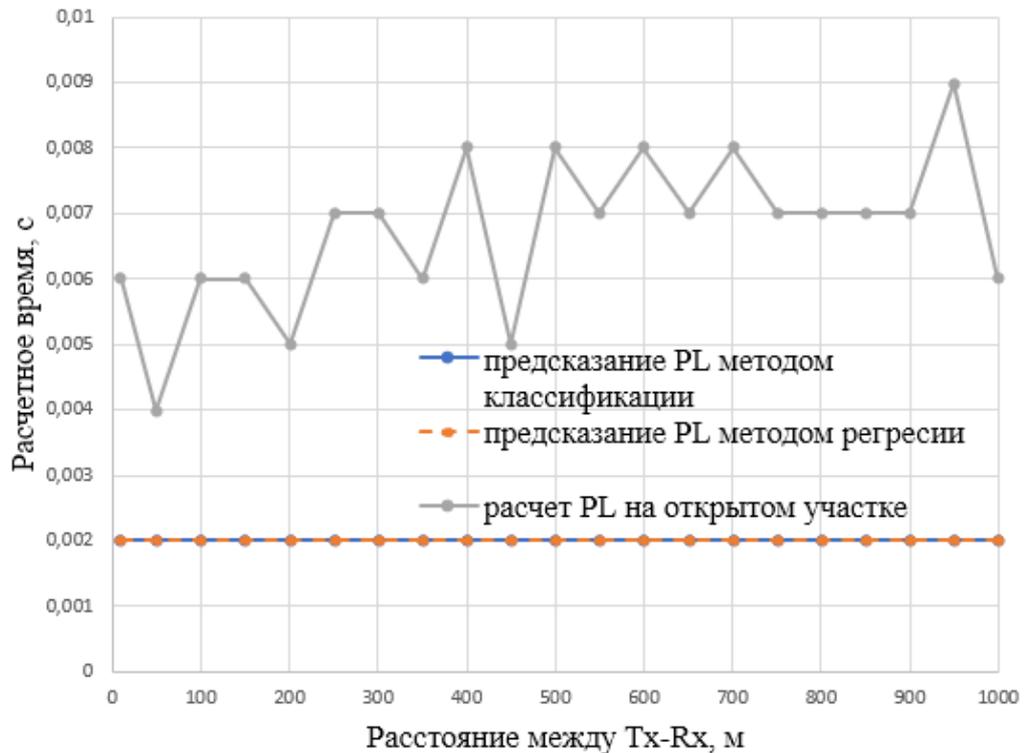


Рисунок 55 – Время расчета и предсказания PL в зависимости от расстояния между Tx-Rx без учета времени обучения

В таблице 9 приведен пример сокращения времени выполнения радиопланирования за счет применения методов машинного обучения на примере тоннельного участка длиной 3 км, по которому поезд движется со средней скоростью 40 км/ч. При такой скорости движения поезд проедет указанное расстояние за 270 секунды. В разработанном симуляторе шаг симуляции выбран равным 1 секунде, таким образом, для моделирования указанного участка будут выполнены расчеты в 270 точках моделируемого участка. В каждой точке рассчитывается в среднем 4 значения величины PL: от головного вагона поезда по двух ближайших БС впереди, от хвостового вагона поезда до двух ближайших БС сзади.

Таблица 9 – Время выполнения радиопланирования на тоннельном участке 3 км

Длина участка	3 км
Средняя скорость движения	40 км/ч
Количество точек	270
Среднее расстояние между передатчиком и приёмником	300 м
Время расчета PL по (21) в тоннельном сценарии	24 сек
Время предсказания PL с помощью автоматизированного алгоритма	0,002 сек
Время обучения автоматизированного алгоритма	71 сек (выполняется один раз за время моделирования участка)
Итоговое время моделирования при применении модели затухания (21)	7,2 часа = 432 мин ($270 \cdot 4 \cdot 24\text{сек}$)
Итоговое время моделирования при применении методов машинного обучения	0,02 часа = 1,2 мин ($270 \cdot 4 \cdot 0,02\text{сек} + 71\text{сек}$)

По приведенным в таблице 9 итоговым значениям времени, необходимым для моделирования, видно, что применение методов машинного обучения в сотни ($432/1,2 = 360$ для приведенного примера) раз сокращает время выполнения процедуры моделирования. Но время выполнения этапа симулятора трафика, приведенное в таблице, не является финальным, так как не учитывает возможности распараллеливания исходного алгоритма на Matlab. Для итогового сравнения времени выполнения радиопланирования, заключающегося в вызове алгоритма расстановки БС и симулятора трафика, приведена сводная таблица на примере участков длиной 3, 10 и 20 км. Скорость движения и времена расчета и предсказания PL такие же, как в таблице 9.

Таблица 10 – Время выполнения радиопланирования с учетом распараллеливания

Длина участка, км	3	10	20
Количество точек для моделирования участка	270	900	1800
Время анализа, мин (модель затухания)	432	1440	2880
Время анализа после распараллеливания, мин (модель затухания)	8,6	28,8	57,6
Время анализа, мин (автоматизированный алгоритм)	1,3	1,3	1,3
Итоговое время после распараллеливания и 15ти повторений вызова симулятора трафика, мин (модель затухания)	129	432	864
Итоговое время после распараллеливания и 15ти повторений вызова симулятора трафика, мин (автоматизированный алгоритм)	19,5	59,9	120,1
Уменьшение времени исполнения при использовании автоматизированного алгоритма, раз	7		

В таблице 10 приведены времена выполнения с учетом параллельного выполнения симулятора трафика, также учтена необходимость многократного запуска симулятора трафика (в таблице 10 количество повторений равно 15, что соответствует усредненному значению по всем проанализированным участкам метрополитена). Многократный запуск необходим для формирования итоговой расстановки БС на выходе симулятора трафика, после корректировки расстановки относительно расстановки на выходе алгоритма расстановки. После первичного запуска симулятора для проверки расстановки БС, сформированной алгоритмом расстановки, часто расстановка нуждается в доработке из-за возникновения эффекта экранирования и других.

При использовании автоматизированного алгоритма предсказания РЛ предлагается следующий подход. Так как автоматизированный алгоритм

предсказания RL обладает достаточной точностью, но ошибка предсказания RL относительно модели затухания не стремится к нулю, предлагается часть запусков симулятора выполнять с помощью автоматизированного алгоритма предсказания RL (в примере из таблицы 13 из 15), и финальные запуски с помощью разработанной модели затухания. Благодаря этому время выполнения радиопланирования сократилось в 7 раз по времени при сохранении точности расстановки БС относительно метода, когда на всех этапах используется разработанная модель затухания сигнала (23).

3.7 Влияние количества используемых метрик на точность предсказания величины RL

Набор из максимального количества признаков, приведенных в пункте 3.3, содержит 32 признака. При использовании такого полного набора признаков на практике возникает вопрос нехватки вычислительных мощностей компьютера.

За счет использования метода случайного леса приходится одновременно хранить в памяти много зависимостей. Для решения этой проблемы произведен анализ на важность признаков, по результатам которого будет определен минимально необходимый набор для решения задачи. График, показывающий важность каждого признака на точность предсказания итогового RL представлен на рисунке 56.

По оси Y представлены параметры, по оси X важность каждого признака для предсказания величины RL. Также на рисунке 56 приведена расшифровка всех анализируемых признаков. Важность означает относительный вклад соответствующего признака, рассчитанный путем взятия вклада каждого признака в каждое дерево решений и усредненное по всем деревьям.

Наиболее важным для любого типа участков (открытого и закрытого) является расстояние. Также важными оказались минимальное, усредненное и среднеквадратическое отклонение значения радиуса поворота по горизонтали. При исследовании влияния разного количества признаков на точность предсказания

величины PL были получены следующие результаты, представленные в таблице 11.

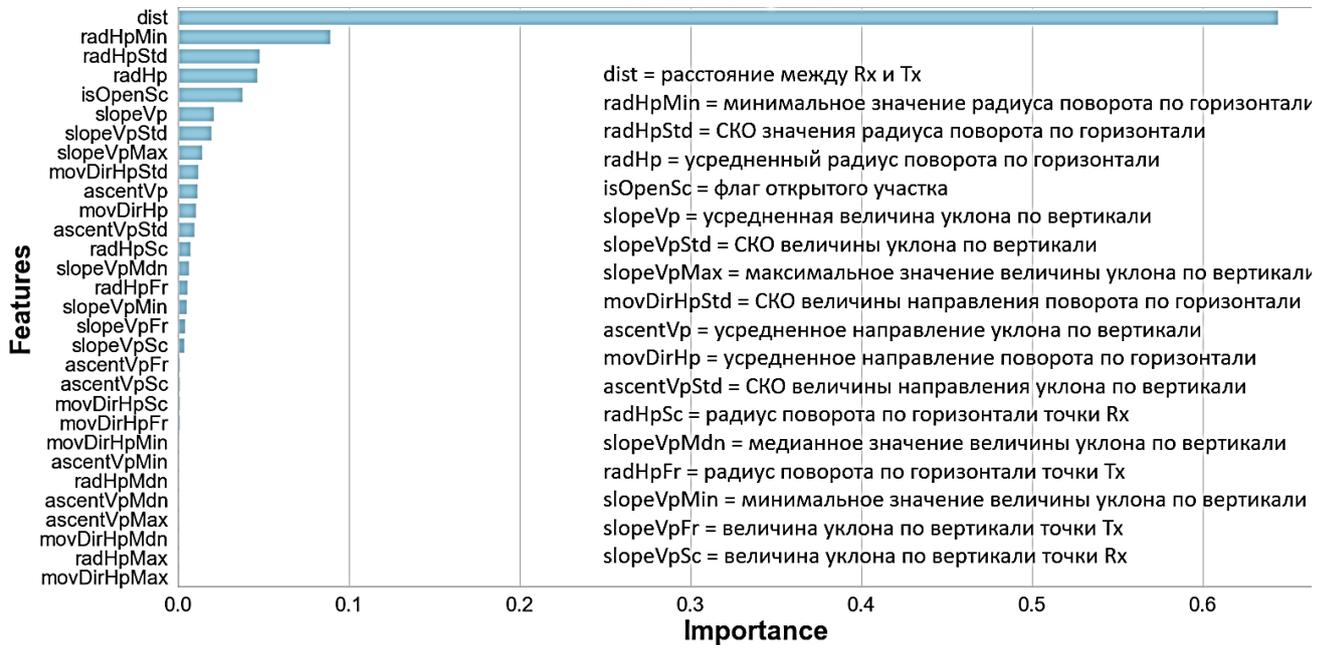


Рисунок 56 – Оценка влияния признаков на предсказание PL

Таблица 11 – Влияние количества признаков на точность предсказания PL и время выполнения

Количество признаков, шт.	Точность предсказания, %	Время исполнения (1000 точек), мин
32	85	3
16	83	1.2
10	67	0.9

После произведенного анализа сделан вывод, что допустимо использовать 16 наиболее важных признаков, при незначительном ухудшении точности на 2% и значительном уменьшении нагрузки на память на 27%. Использование полного набора признаков приводит к увеличению времени вычисления, но не приводит к значимому увеличению точности в сравнении со случаем, когда используется 16 признаков. Использование 10 признаков уже значительно ухудшает значение точности предсказания, хотя и сокращает время на вычисление. Для использования выбраны 16 наиболее влиятельных признаков. На рисунках 57 и 58 приведены

зависимости PL при использовании набора из шестнадцати наиболее важных признаков.

На рисунках 57, 58 введены следующие обозначения: PL,dB – величина потери мощности сигнала в децибелах; Distance(m) – координаты вдоль исследуемого участка в метрах; Edge – границы анализируемого участка линии метрополитена; Real – значения PL, рассчитанные с помощью разработанной модели (23); Preds – значения PL, предсказанные с помощью разработанного автоматизированного алгоритма радиопланирования; bs – точки расположения БС.

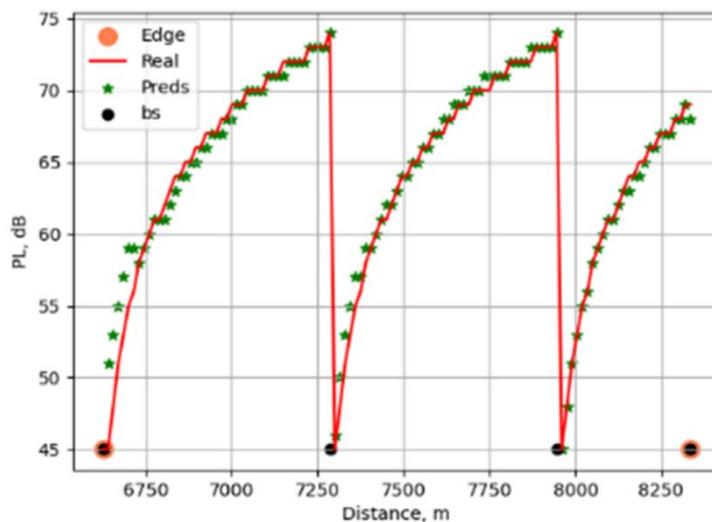


Рисунок 57 – Предсказанные PL на открытом участке

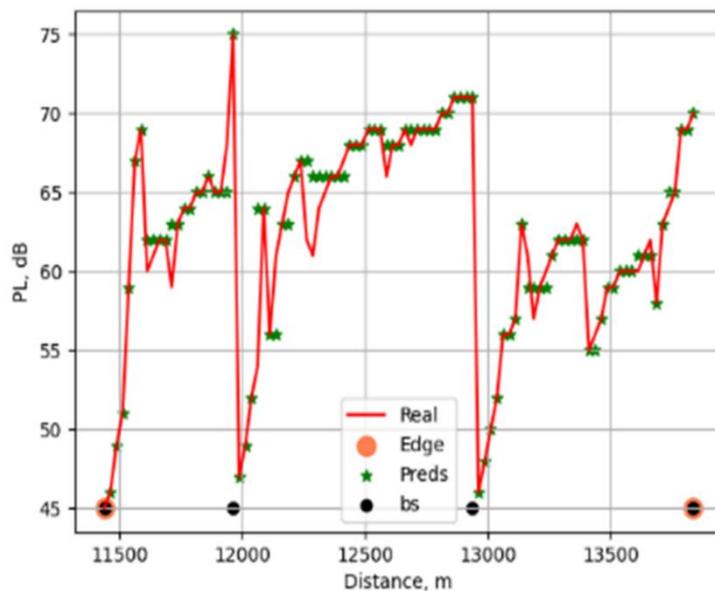


Рисунок 58 – Предсказанные PL на тоннельном участке

По приведенным на рисунках 57 и 58 зависимостям видно, что использование выбранного метода случайного леса с основными 16-ю метриками с высокой точностью предсказывает уровень PL на участках линий метрополитена различного типа. Использование метода случайного леса снизило время вычисления величины PL с сохранением точности.

3.8 Выводы по главе 3

По результатам, приведенным в главе 3, можно сделать следующие выводы:

1. По результатам проведенного анализа современных методов машинного обучения, был выбран метод случайного леса, который обеспечивает погрешность при предсказании PL равную 1.9 дБ и 0.3 дБ для тоннельного и открытого участков соответственно, относительно метода расчета с использованием напрямую разработанной модели затухания (23);
2. Разработана структура данных для обучения выбранного метода. Используемые данные содержат информацию и геометрических параметрах области распространения сигнала. По результатам исследований был выбран набор из 16-ти признаков;
3. Разработанный автоматизированный алгоритм предсказания PL характеризуется значительным сокращением времени выполнения задач радиопланирования в среднем в 7 раз.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ ПРИ РАДИОПЛАНИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ НА ЛИНИЯХ МЕТРО

В четвертой главе приведены примеры применения комплекса разработанных алгоритмов (далее по тексту будем использовать единый термин «алгоритм» для всех разработанных инструментов) на линиях метрополитена Москвы различного типа для решения задач радиопланирования при развертывании новых беспроводных сетей и усовершенствования существующих.

Продемонстрировано преимущество использования разработанного комплекса алгоритмов для решения задач радиопланирования по сравнению с ранее существующим подходом, с точки зрения обеспечения непрерывного покрытия линий метрополитена с помощью минимального количества задействованных БС.

Представленные результаты опубликованы в статьях [3, 5] и представлены на конференциях [9, 10, 12, 11, 6, 7].

4.1 Предположения при проведении анализа

Для проведения анализа на линиях с существующей расстановкой БС используется разработанный симулятор беспроводного трафика в метро. В симуляторе генерируется поток поездов, движущихся в соответствии с заданной моделью движения. Параметры движения считаются постоянными, случайные отклонения отсутствуют, движение всех поездов на линии идентично.

В процессе движения в каждый момент времени головной и хвостовой вагоны составов обладают информацией о величинах потерь при распространении радиосигнала до ближайших к ним БС. При вычислении потерь учитываются как геометрия тоннеля, так и наличие других составов в тоннеле, которые могут экранировать трассу сигнала. С учетом определенных величин потерь PL, в каждый момент времени для каждого состава выбирается рабочая станция на составе и

рабочая БС, которые обеспечивают максимальный уровень принимаемой мощности (минимальное значение потерь). После прохода поездом всей линии формируются зависимости величины потерь в рабочем канале связи, номера рабочей БС и номера рабочей станции состава от координаты.

По полученным зависимостям производится анализ на:

- 1) наличие участков с недостаточным покрытием радиосетью (потери превышают допустимый порог);
- 2) возникновение полного экранирования поезда от всех БС другими поездами на линии;
- 3) возникновение перекрытия оптимальной БС, приводящего к необходимости переключения поезда на следующую БС по возрастанию PL , для которой PL может оказаться выше порога;
- 4) населенность БС (количество одновременно подключенных составов к БС);
- 5) загруженность БС (процент времени, когда БС используется какими-либо составами).

После проведения анализа формируются рекомендации по устранению выявленных проблем.

Порог затухания подбирается исходя из характеристик излучаемой мощности оборудования и требуемого уровня принимаемой мощности для обеспечения необходимого режима работы. Предполагается работа системы с максимальной пропускной способностью или с небольшим снижением относительно максимальной пропускной способности. Передаваемая мощность задается на входе в антенну в расчете на одну антенну. Аналогично задается принимаемая мощность на выходе из приемной антенны также в расчете на одну антенну [66, 84, 98, 103, 106].

Схема комплекса разработанных алгоритмов, который был разработан в результате данного диссертационного исследования и применен компанией ООО «Радио Гигабит» (акт о внедрении приведен в Приложении А) при радиопланировании беспроводных сетей в метрополитенах, приведен на рисунке 59.

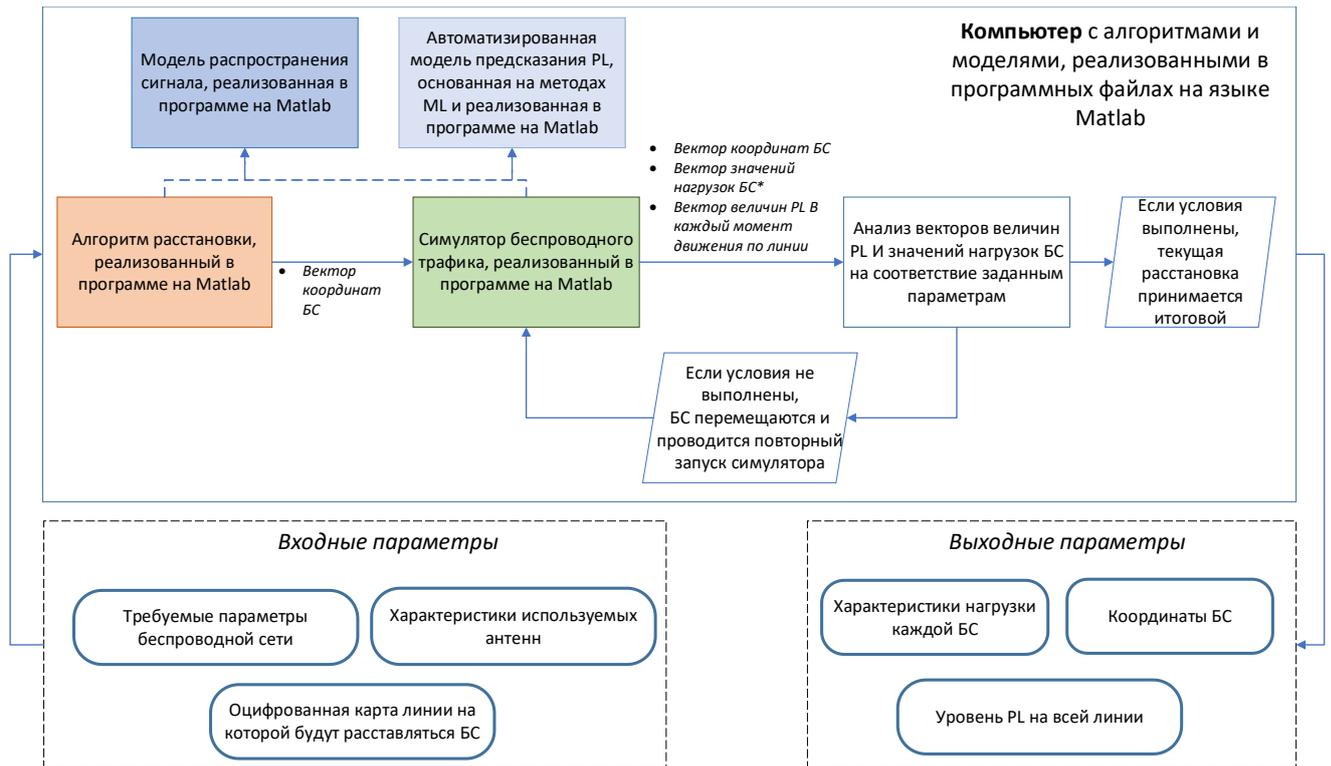


Рисунок 59 – Блок-схема итогового программного комплекса

4.2 Пример применения разработанных алгоритмов для анализа существующей сети БС на подземной линии

В качестве подземной линии используется Калужско-Рижская линия. Параметры движения на Калужско-Рижской линии представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры движения поездов на Калужско-Рижской линии

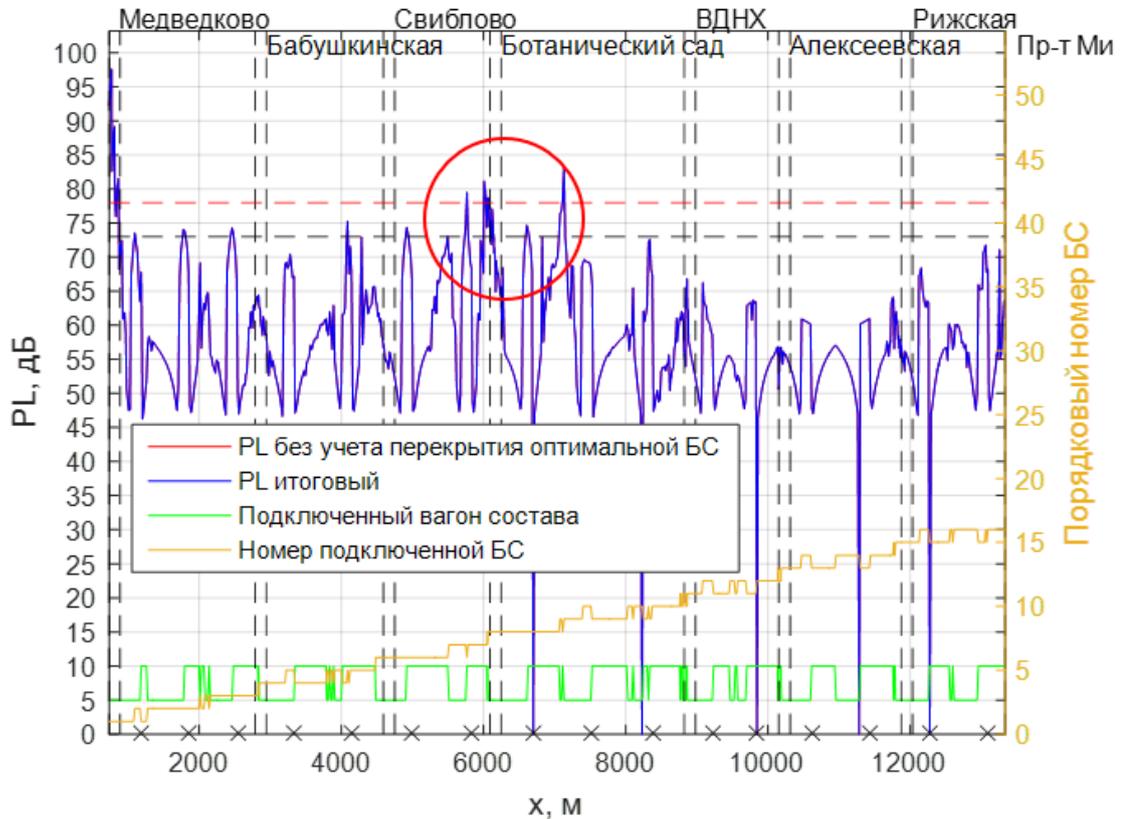
Параметр	Значение
Максимальная скорость	65 км/ч
Средняя эксплуатационная скорость	39,6 км/ч
Время стоянки на станции	23 с
Период следования	90 с
Ускорение при разгоне и торможении	0,45 м/с ²
Длина поезда	153 м

Результаты анализа покрытия первого пути Калужско-Рижской линии показаны на рисунке 60. Калужско-Рижская линия является полностью подземной. На графиках отмечены границы перегонов с соответствующими названиями станций и координаты расположения БС в исходной расстановке (символы «х»). На рисунке 60 приведены кривые зависимости PL до рабочей БС от координаты продвижения поезда по линии с учетом и без учета возникновения ситуаций экранирования, кривые подключенного состава от координаты (высокий уровень – подключение через оборудование хвостового вагона, низкий уровень – подключение через оборудование головного вагона), зависимость порядкового номера рабочей БС от координаты поезда.

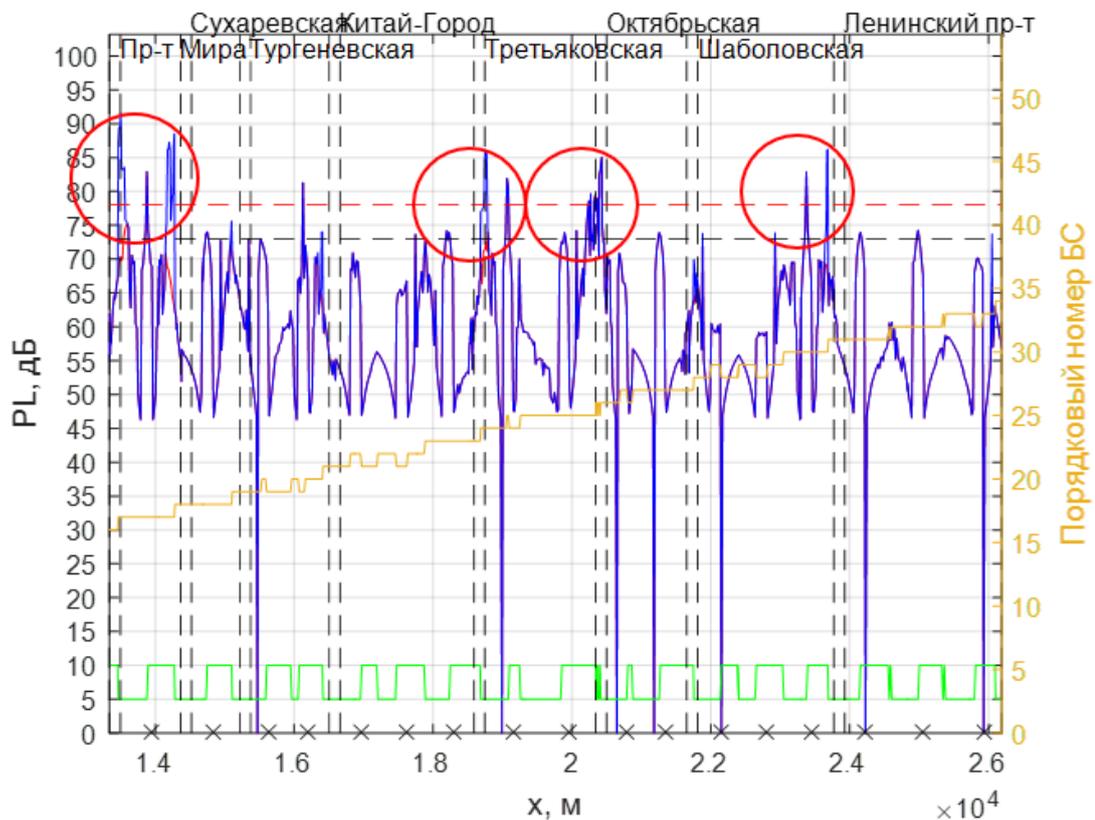
В качестве максимально допустимого затухания сигнала рассматривается значение 78 дБ, полученное прибавлением типичной погрешности расчета затухания 5 дБ к стандартному порогу в 73 дБ. На приведенных зависимостях отмечены области превышения PL.

На первом пути обнаружено большое количество проблемных зон с недостаточным уровнем покрытия. Уровень потерь, превышающий пороговый, обнаружен на перегонах Свиблово – Ботанический сад (рисунок 60а), превышение около станции Ботанический сад, Ботанический сад – ВДНХ (рисунок 60а), Проспект Мира – Сухаревская (рисунок 60б), Третьяковская – Октябрьская (рисунок 60б), превышение около станций Третьяковская и Октябрьская (рисунок 60б), Шаболовская – Ленинский проспект (рисунок 60б), Коньково – Теплый Стан (рисунок 60в) и Теплый Стан – Ясенево (рисунок 60в). Проблемные зоны в двух

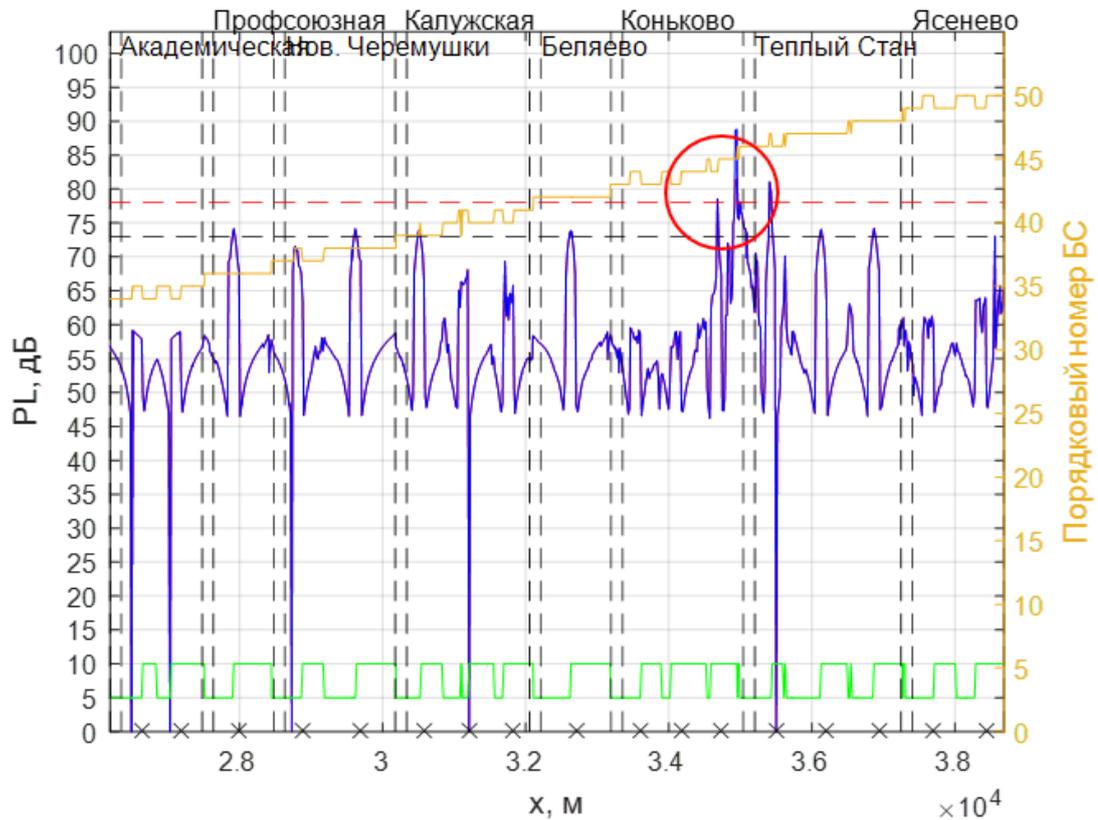
последних перегонах из перечисленных расположены около станции Теплый Стан (рисунок 60в).



а)



б)



в)

Рисунок 60 (а, б, в) – Зависимости потерь мощности сигнала от координаты на 1-м пути Калужско-Рижской линии

Превышение уровня потерь над пороговым значением на станции Медведково (рисунок 60а) не считаем проблемной зоной, требующей устранения за счет установки дополнительной БС, так как перегон Медведково – Бабушкинская (рисунок 60а) является последним перегонем на Калужско-Рижской линии при движении по 1-му пути. Станция Медведково (рисунок 60а) является последней станцией на 1-м пути, после которой движение пассажиров в поезде не предполагается, следовательно, нет необходимости в передаче информации в рабочем канале при максимальной пропускной способности при остановке поезда на станции и после нее. Кроме зоны платформы станции Медведково, условие на максимальную пропускную способность выполняется на всем перегоне Медведково – Бабушкинская (рисунок 60а).

Анализ на возникновение полного экранирования поезда от всех БС другими поездами на линии был проведен для двух путей и показал, что вероятность

возникновения таких ситуаций на Калужско-Рижской линии, как и для всех закрытых линий, стремится к нулю.

Анализ на возникновение перекрытия БС, обеспечивающей наименьшее значение PL, приводящего к необходимости переключения поезда на БС со следующим по возрастанию PL, показал, что для первого пути вероятность возникновения составляет около 2%. Перекрытие оптимальной БС стало причиной превышения уровня потерь порогового значения на первом пути на перегонах Проспект Мира – Сухаревская (рисунок 60б) и Третьяковская – Октябрьская (рисунок 60б).

Участки с уровнем потерь, превышающим порог для большей части участков первого пути на Калужско-Рижской линии, обусловлены недостаточной плотностью БС. Участки недостаточного покрытия могут быть устранены после установки дополнительных БС.

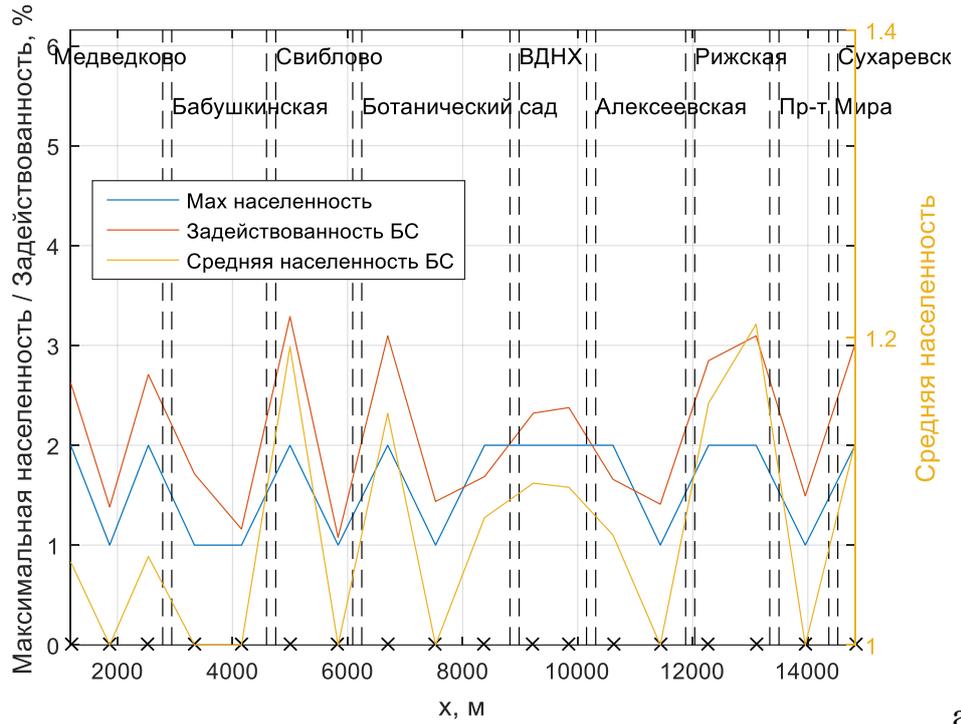
На рисунке 61 приведены результаты анализа нагрузки БС, который включает в себя оценку процента времени, когда БС активна, оценку максимальной населенности и оценку средней населенности данной БС для Калужско-Рижской линии.

На перегоне Проспект Мира – Сухаревская (рисунок 61б) в области превышения уровня потерь порогового значения из-за перекрытия оптимальной БС на 1-м пути расположена единственная БС, что является недостаточным в данном случае.

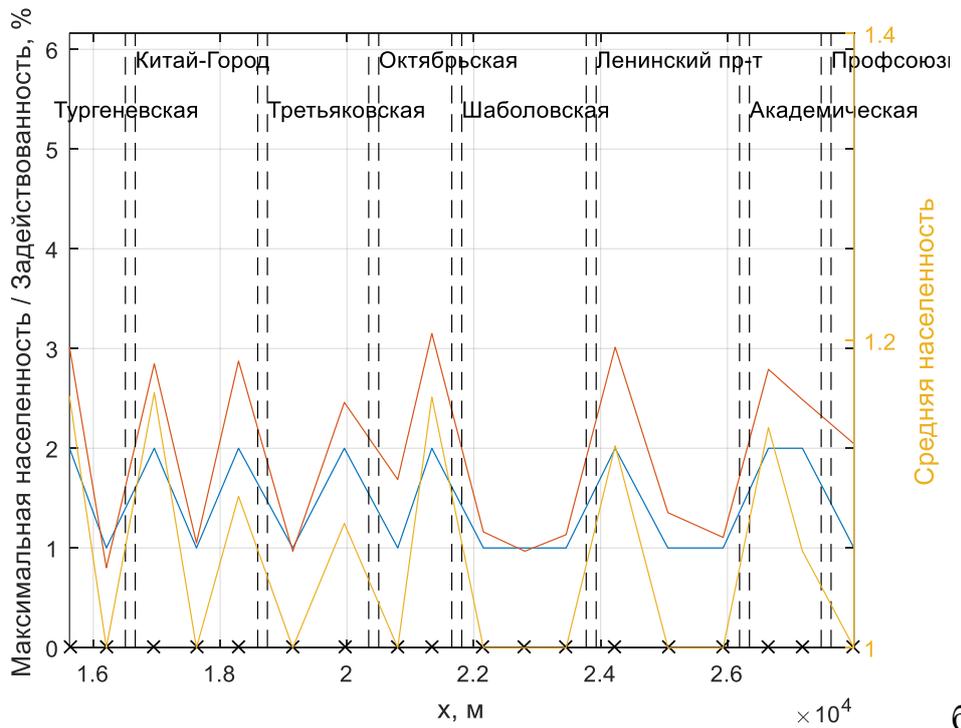
Количественные результаты проведенного анализа отображены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты анализа 1-го пути Калужско-Рижской линии

Параметр	Значение
Вероятность полного экранирования БС	0%
Средняя вероятность экранирования оптимальной БС	1,8%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	92,7%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	7,3%
Средняя населенность БС	1,07



а)



б)

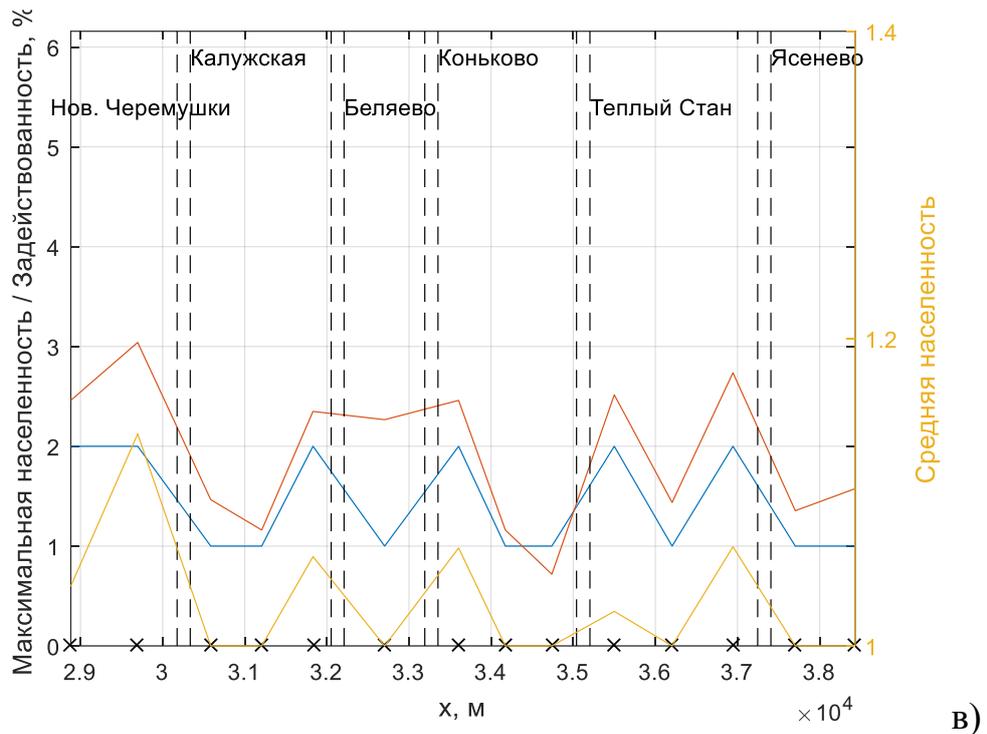


Рисунок 61 (а, б, в) – Результаты анализа нагрузки БС на 1-м пути Калужско-Рижской линии

Для первого пути Калужско-Рижской линии характерен небольшой разброс в величине задействованности между БС. Максимальная населенность БС, равная 2, преимущественно наблюдается у БС, расположенных около платформ станций метро. Максимальные средние населенности БС находятся на уровне 1,2, у большинства БС эта величина находится в пределах 1–1,1, что говорит о том, что при подключении к одной БС одновременно двух составов такое соединение не продолжается длительное время. Полученный вывод подтверждается результатами из таблицы 13, где видно, что вероятность подключения к одной БС одновременно двух поездов, что ведет к разделению ресурса, сильно меньше (7,3 %) времени, когда одна БС обслуживает только один поезд (92,7%). Что также отражается в средней населенности 1,07, что незначительно превышает идеальный случай, когда средняя населенность равна 1.

Вероятность полного экранирования для рассматриваемой линии равна 0, что является характерным для полностью закрытой линии. Величина средней вероятности экранирования оптимальной (под оптимальной в данном контексте

понимается БС, обеспечивающая минимальное PL) в идеальном случае стремиться к нулю, в данном примере эта величина близка к 2%.

Для устранения выявленных проблемных зон с покрытием хуже требуемого выработаны рекомендации по установке дополнительных БС.

На рисунках 62–66 отображена геометрия анализируемых перегонов в горизонтальном плане. На приведенных планах отмечено положение дополнительных БС (зеленым) относительно исходных (красным) в соответствующих перегонах (платформы выделены синим).

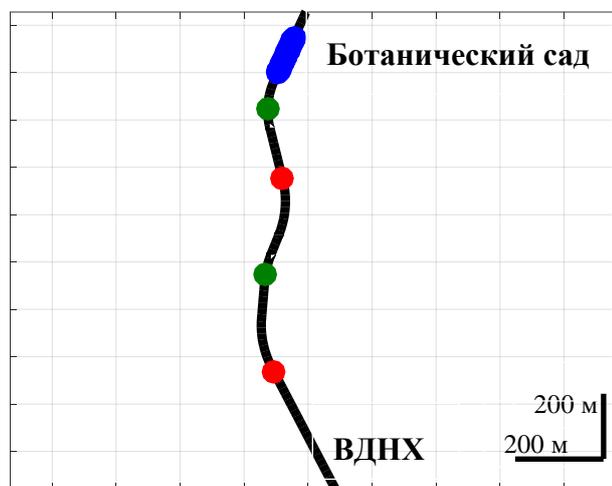


Рисунок 62 – Расположение дополнительных БС на горизонтальном плане в перегоне Ботанический сад – ВДНХ 1-го пути

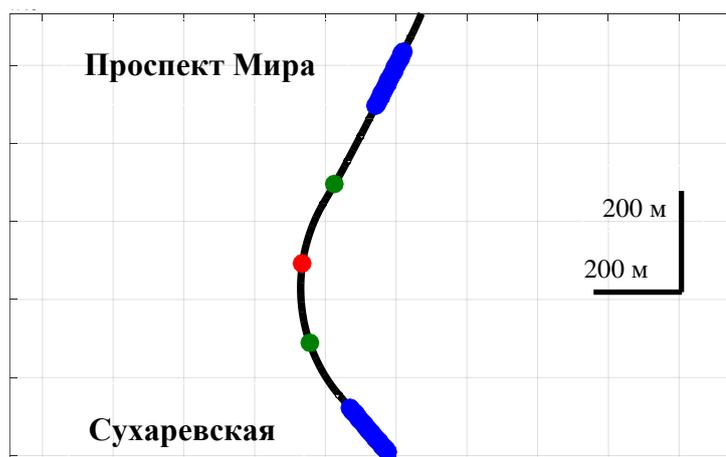


Рисунок 63 – Расположение дополнительных БС на горизонтальном плане в перегоне Проспект Мира – Сухаревская 1-го пути

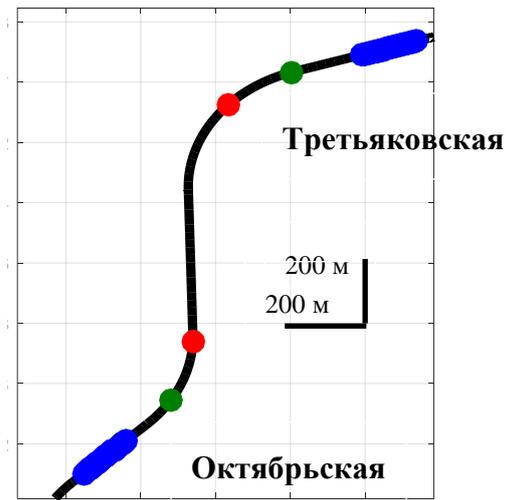


Рисунок 64 – Расположение дополнительных БС на горизонтальном плане в перегоне Третьяковская – Октябрьская 1-го пути

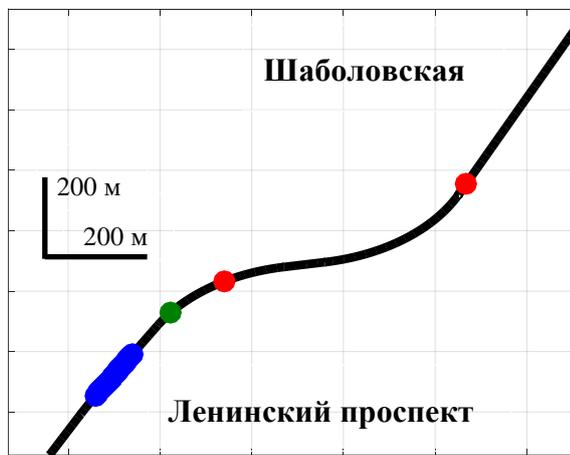


Рисунок 65 – Расположение дополнительной БС на горизонтальном плане в перегоне Шаболовская – Ленинский проспект 1-го пути

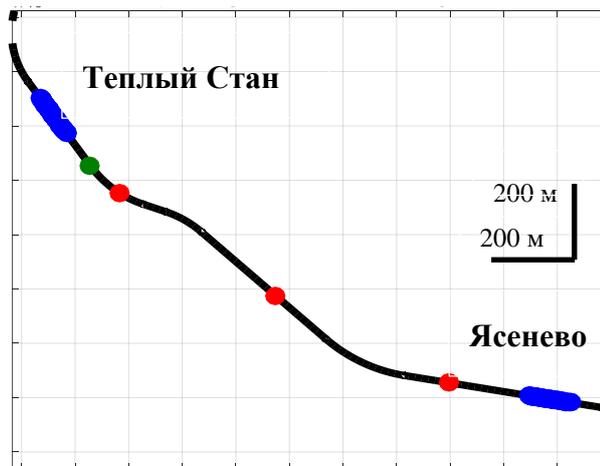


Рисунок 66 – Расположение дополнительной БС на горизонтальном плане в перегоне Теплый Стан – Ясенево 1-го пути

На рисунке 67 показаны зависимости уровней потерь мощности от координаты до (красная кривая) и после (синяя кривая) установки дополнительных БС. Также отмечено положение исходных БС (красным) и дополнительных (синим).

На них видно, что дополнительные БС исправили проблемы недостаточного покрытия.

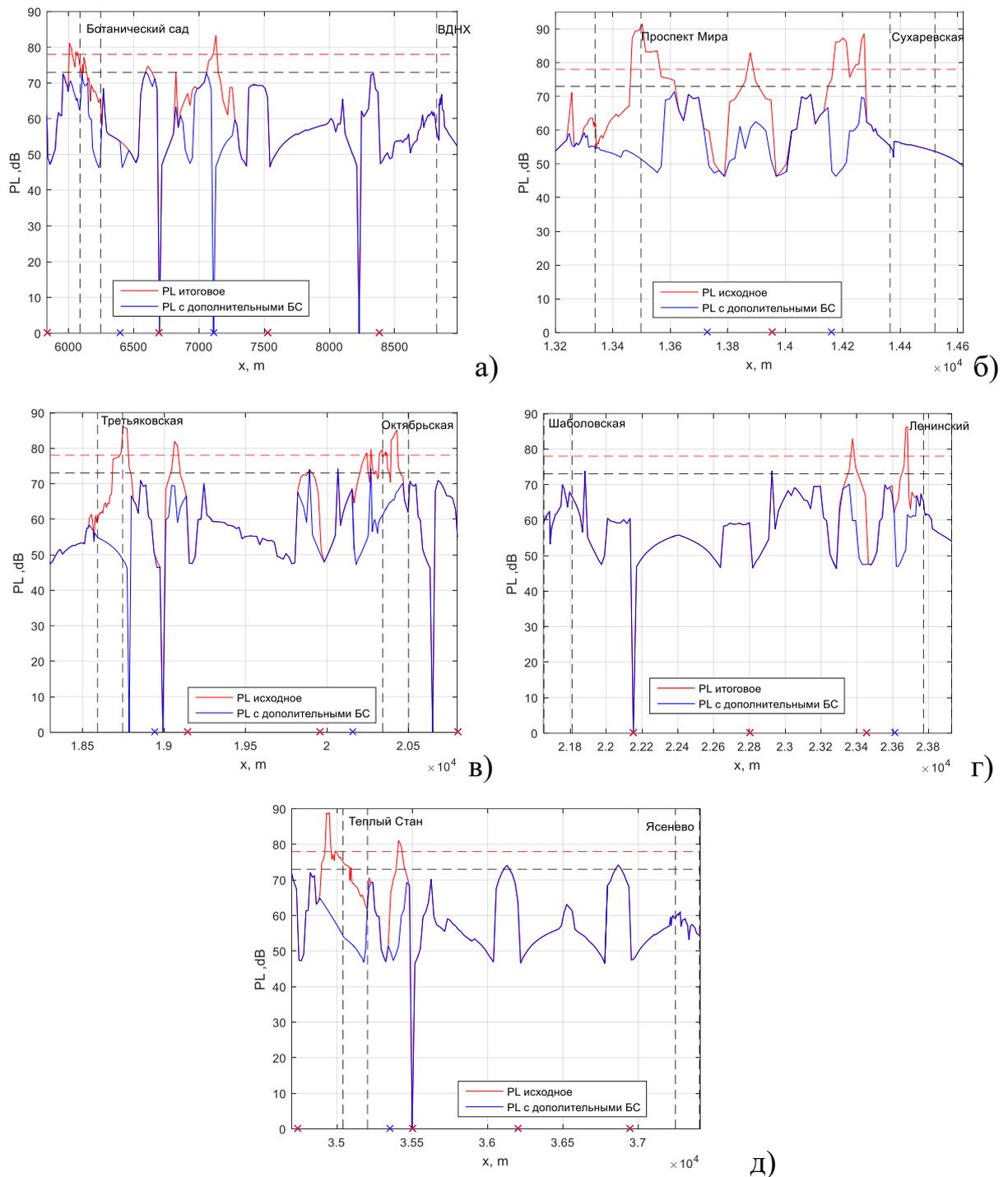


Рисунок 67 (а, б, в, г, д) – Сравнение исходного уровня потерь мощности с уровнями потерь после установки дополнительных БС на 1-м пути

После установки дополнительных БС был повторно проведен анализ нагрузки БС. На рисунке 68б приведены результаты повторного анализа нагрузки БС, максимальной и средней населенностей БС первого пути Калужско-Рижской линии после установки дополнительных БС. Для сравнения – результаты нагрузки сети БС до установки дополнительных БС приведены на рисунке 68а.

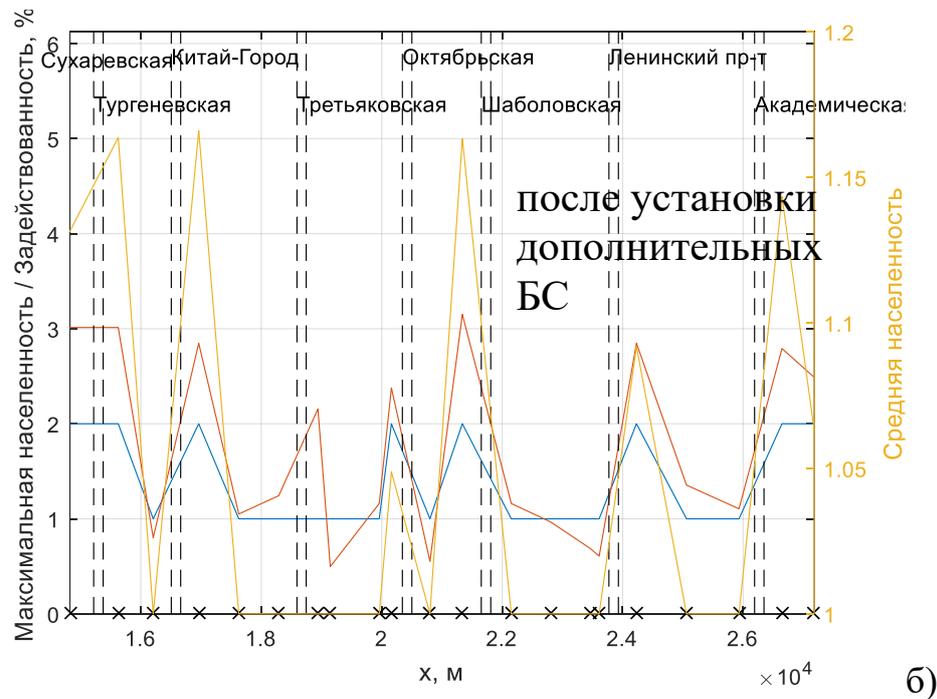
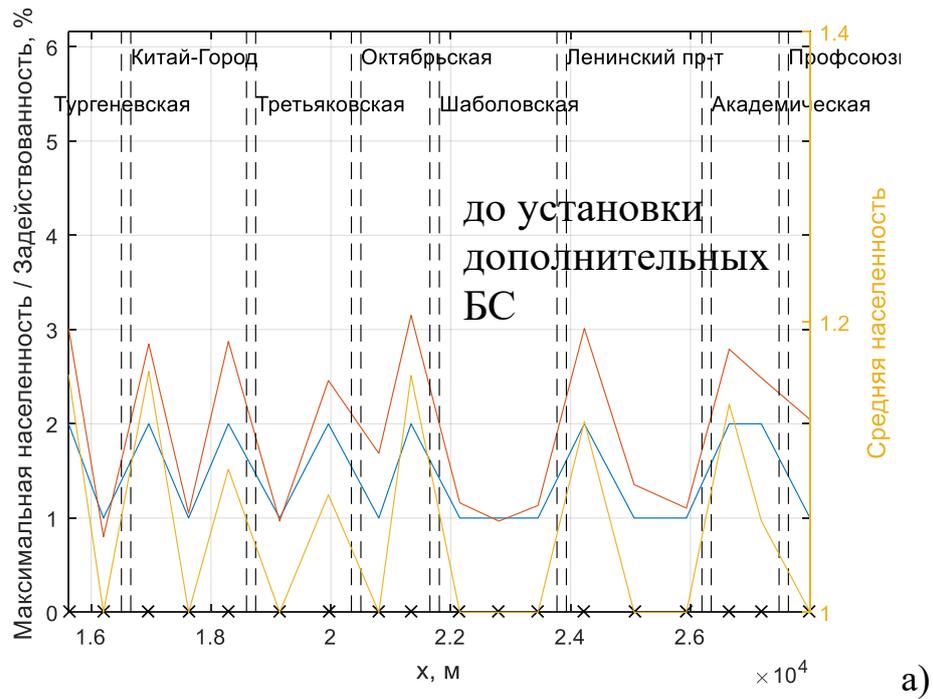


Рисунок 68 (а, б) – Результаты сравнение анализа нагрузки БС на 1-м пути Калужско-Рижской линии до и после установки дополнительных БС

Повторный анализ нагрузки БС после установки дополнительных БС, приведенный в таблице 14, показывает, что вероятность перекрытия оптимальной БС, вероятность подключения к одной БС двух поездов и средняя населенность БС снизились после установки дополнительных БС.

Таблица 14 – Результаты анализа 1-го пути Калужско-Рижской линии

Параметр	Значение в текущей сети	Значение после установки доп. БС
Количество БС участке	50	58
Вероятность полного экранирования БС	0%	0%
Вероятность экранирования оптимальной БС	1,8%	0,7%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	92,7%	95,2%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	7,3%	4,8%
Средняя населенность БС	1,07	1,04

Приведенные в таблице 14 результаты измерения нагрузки БС до и после установления дополнительных БС, показывают, что в дополненной сети БС средняя нагрузка, вероятность подключения одновременно двух поездов к одной БС и вероятность экранирования оптимальной БС сократились, что является положительным следствием установки дополнительных БС, направленных на исправление зон недостаточного покрытия.

4.3 Пример применения разработанных алгоритмов при проектировании сети БС на подземной линии

Для иллюстрации эффективности разработанного аппаратно-программного комплекса приводится сравнение полученной им расстановки БС с исходной расстановкой БС, существующей на линии, но дополненной БС для исправления зон с недостаточным покрытием. Для примера сравнения выбрана полностью подземная Калужско-Рижская линия.

На рисунках 69–70 представлено сравнение оптимальной расстановки БС (под оптимальной понимается расстановка БС, сформированная с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса) на участке Ботанический сад – Сухаревская Калужско-Рижской линии и исходной расстановки с дополнительными БС, полученными после проведенного в разделе 4.2 анализа.

На рисунках на горизонтальном плане исследуемого участка отмечены границы станций с их названиями, отмечены БС в исходной расстановке с дополнительными БС и БС в оптимальной расстановке. Красным цветом отображено положение БС в оптимальной расстановке в перегонах между станциями, зеленым – положение БС в исходной расстановке с дополнительными БС.

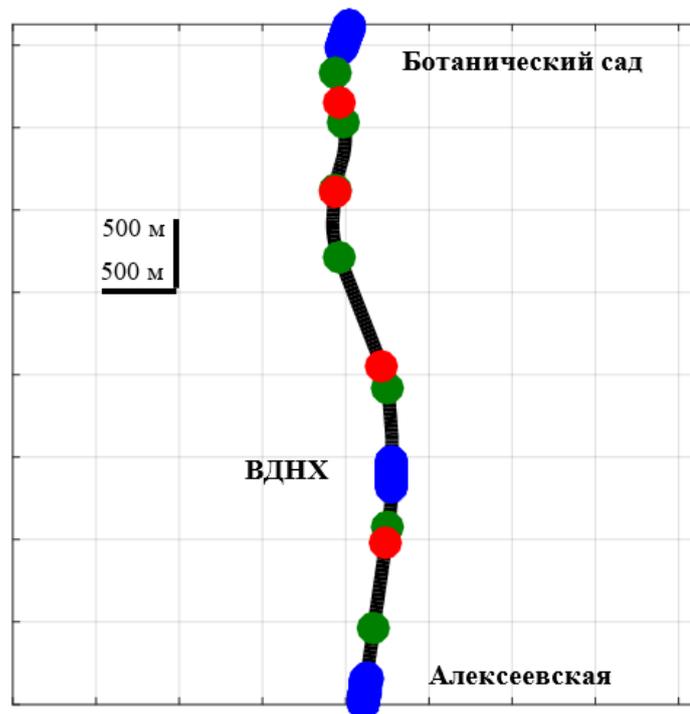


Рисунок 69 – Сравнение расстановок БС на участке Ботанический сад – Алексеевская Калужско-Рижской линии

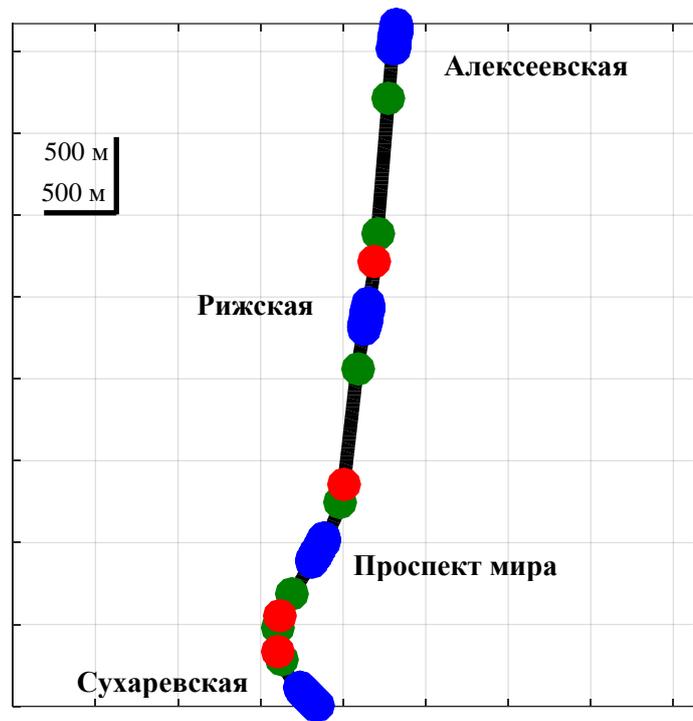
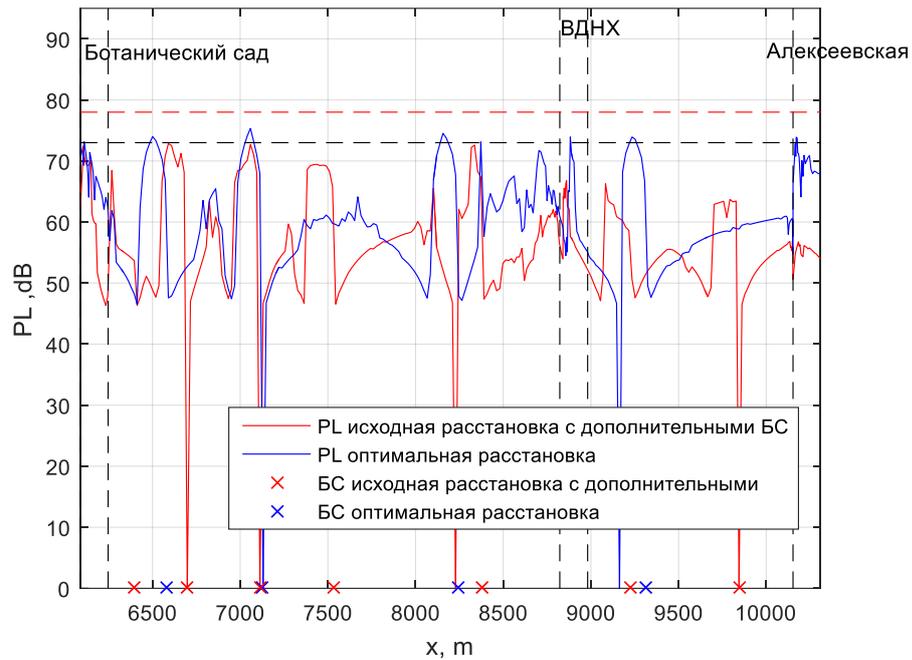


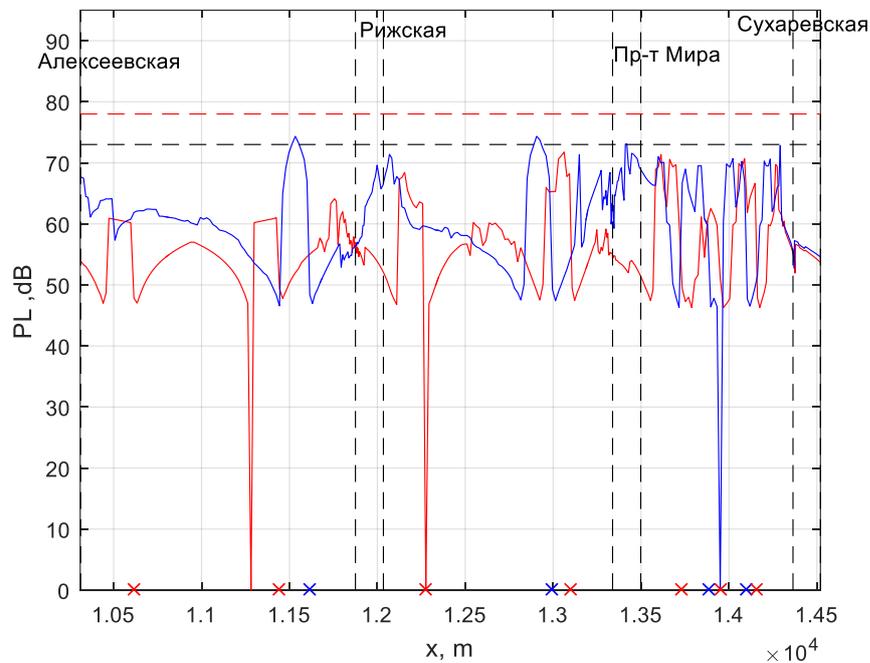
Рисунок 70 – Сравнение расстановок БС на участке Алексеевская – Сухаревская
Калужско-Рижской линии

На рисунке 71 представлено сравнение уровней потерь PL сигнала в двух расстановках. Красным цветом отмечены БС и соответствующая кривая PL для исходной расстановки с дополнительными БС, синим – БС и кривая PL для оптимальной расстановки.

В исходной расстановке на каждом пути располагается 50 БС. По итогам анализа существующей радиосети, приведенном в предыдущем разделе, на первый путь необходимо добавить 8 БС. Таким образом, на первом пути остается 58 рабочих БС. При оптимальной расстановке потребуется 43 БС на каждом пути. Выигрыш составляет 11 БС при использовании разработанного аппаратно-программного комплекса.



а)



б)

Рисунок 71 (а, б) – Сравнение уровней потерь сигнала при исходной расстановке с дополнительными БС и при оптимальной расстановке

По приведенным на рисунке кривым видно, что при использовании меньшего количества БС оптимальная расстановка обеспечивает покрытие участка заданного качества, где величина PL между поездом и рабочей БС в каждый момент времени при продвижении поезда по линии не превышает критического (порогового) значения PL.

В таблице 15 представлено сравнение количественных результатов нагрузки сети БС в двух расстановках.

Таблица 15 – Сравнение результатов анализа 1-го пути Калужско-Рижской

Параметр	Значения для исходной расстановки после установки доп. БС	Значения для оптимальной расстановки
Количество БС на участке	58	43
Вероятность полного экранирования БС	0%	0%
Вероятность экранирования оптимальной БС	0,7%	0,9%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	95%	92%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	5%	8%
Средняя населенность БС	1,04	1,1

По приведенным значениям видно, что оптимальная сеть БС характеризуется большей вероятностью подключения к БС одновременно двух поездов, но при этом средняя населенность БС увеличилась незначительно. Величина средней населенности равная 1,1 говорит о небольшой нагрузке сети. Обе рассмотренные сети БС обеспечивают непрерывную передачу данных на максимальной скорости на всем протяжении движения поезда по линии, но сеть, полученная в результате оптимальной расстановки, использует меньшее количество БС, а следовательно, является более экономически выгодной, что является ее основным преимуществом.

4.4 Пример анализа сети БС на открытой линии

Примером анализа двухпутного открытого участка является участок Бутовской линии. Приведенный анализ также направлен на иллюстрацию применения разработанного аппаратно-программного комплекса для поиска участков с недостаточным уровнем покрытия. Параметры движения на Бутовской линии представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Параметры движения на открытом участке Бутовской линии

Параметр	Значение
Максимальная скорость	60 км/ч
Средняя эксплуатационная скорость	33,5 км/ч
Время стоянки на станции	15 с
Период следования	155 с
Ускорение при разгоне и торможении	0,2 м/с ²
Длина поезда	90 м

Для двух путей открытого участка линии вероятность перекрытия поездами своего пути также очень мала, но вероятность перекрытия оптимальной БС поездами пути дальнего от ряда БС поездами ближнего к ряду БС пути значительно выше. При перекрытии оптимальной БС для поезда дальнего пути поездами ближнего пути он переключается на БС, обеспечивающей следующий по возрастанию уровень РЛ. Из-за более быстрого по сравнению с тоннелями темпа затухания сигнала в открытом пространстве возможны ситуации, когда уровень РЛ до ближайшей доступной БС превышает допустимое пороговое значение. Анализ возникновения такой ситуации приведен для первого пути (дальнего от ряда БС) открытого участка Бутовской линии на рисунке 72. На графиках отмечены границы перегонов с соответствующими названиями станций, координаты расположения БС в исходной расстановке (символы «х»), кривые РЛ соответствующие подключению к БС, обеспечивающим минимальное значение РЛ, и подключению к БС, обеспечивающее следующее после минимального значение РЛ.

В качестве максимально допустимого затухания сигнала рассматривается значение 78 дБ, полученное прибавлением типичной погрешности расчета затухания 5 дБ к стандартному порогу в 73 дБ, который используется для радиопланирования всех новых участков метрополитенов.

По приведенным зависимостям видно, что вблизи станции Улица Скобелевская, в перегонах Бульвар адмирала Ушакова – Улица Гончарова и Улица Гончарова – Бунинская аллея есть области, где перекрытие оптимальной БС

приведет к превышению PL допустимого порогового значения. Рассматриваемые ситуации перекрытия (экранирования) составом ближнего пути состава дальнего пути возникают из-за того, что антенны БС расположены ниже уровня крыши поезда, на которой расположена поездная антенна. При расположении БС выше уровня крыш данных ситуаций можно было бы избежать, не прибегая к повышению плотности БС.

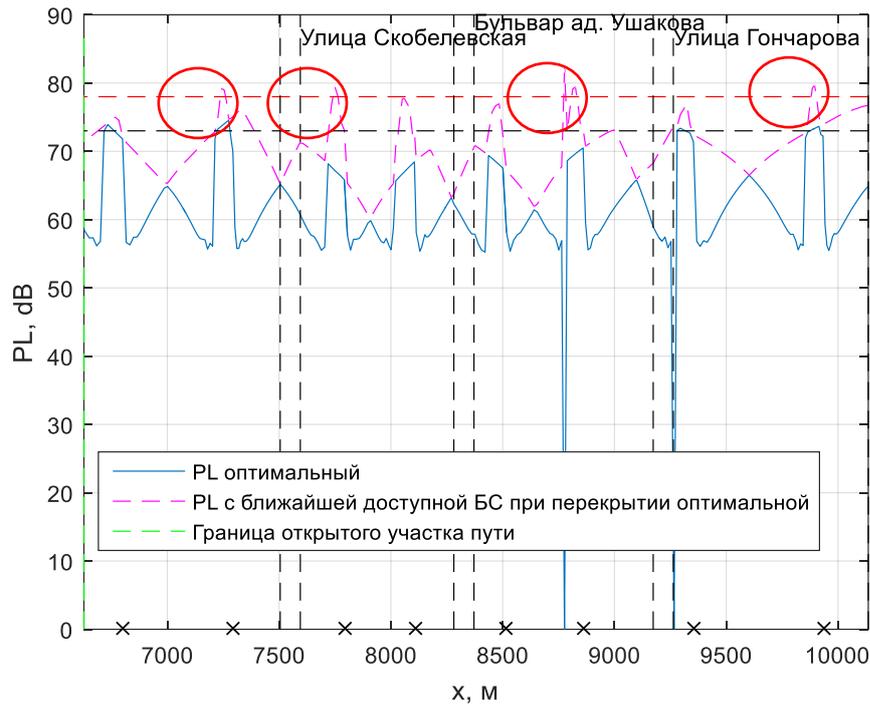


Рисунок 72 – Зависимости потерь сигнала от координаты на открытом участке 1-го пути при подключении к оптимальной БС и следующей БС по возрастанию PL

На рисунке 73 приведены результаты анализа нагрузки БС (которые на открытом участке расположены только вдоль одного пути и обслуживают поезда двух путей), который включает в себя оценку процента времени, когда БС активна, оценку максимальной населенности и оценку средней населенности данной БС для открытого участка Бутовской линии.

По результатам анализа видно, что средняя населенность каждой БС в среднем на 20% выше, чем для аналогичного участка если бы он был однопутным. Но максимальная населенность данного участка Бутовской линии равна 2, при том,

что максимальная населенность двупутного участка равна 4, что говорит о том, что на Бутовской линии интенсивность движения невысокая. Количественные результаты проведенного анализа отображены в таблице 17.

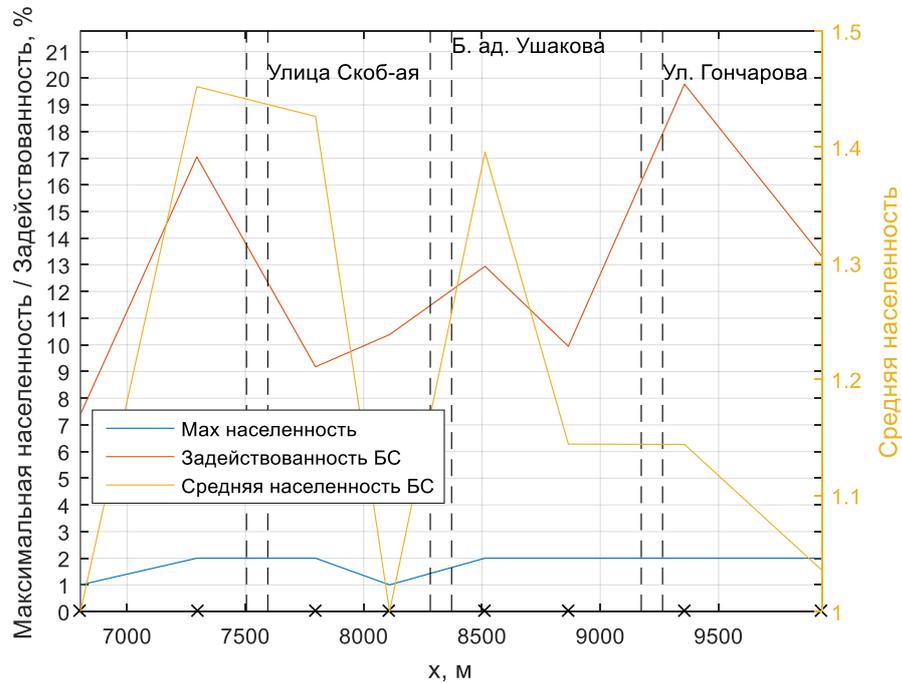


Рисунок 73 – Результаты анализа нагрузки БС на открытом участке линии

Таблица 17 – Результаты анализа открытого участка Бутовской линии

Параметр	Значение
Вероятность полного экранирования БС	0%
Средняя вероятность экранирования оптимальной БС	6%
Максимальная вероятность экранирования опт. БС	22%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	78%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	22%
Средняя населенность БС	1,2

По зависимостям для открытого участка Бутовской линии видно, что к большинству БС может одновременно подключаться более одного поезда, но период следования поездов на рассматриваемой линии достаточно велик, следовательно, максимальное количество подключенных к одной БС поездов равно двум, а не четырем (что является максимумом для открытого участка). На рисунке 72 приведены усредненные значения по ансамблю различных моментов появления

составов двух путей на открытом участке (по различным разницам «фазы» периодических потоков поездов двух путей).

На открытом участке линии средняя населенность некоторых БС превышает 1,4. Поэтому разделение временного ресурса БС также может оказаться одной из причин снижения пропускной способности сети.

Для устранения обнаруженных негативных эффектов рекомендуется установка дополнительных БС, положение которых отображено горизонтальном плане открытого участка Бутовской линии на рисунке 74 зеленым цветом. Желтым отмечена точка начала открытого участка, красным – положение БС в исходной расстановке.

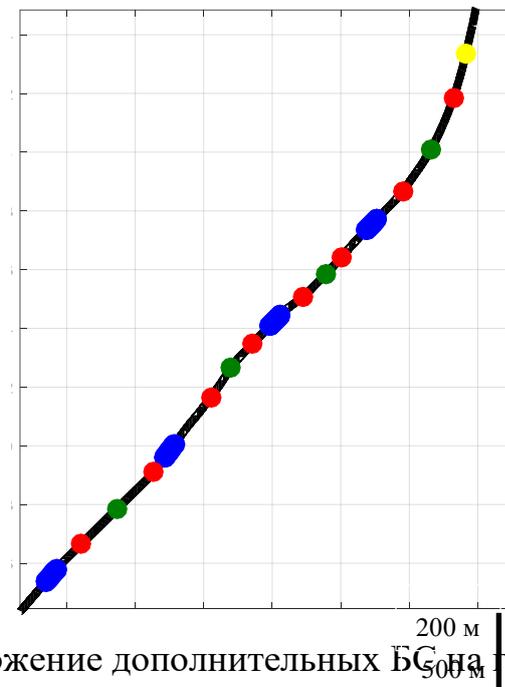


Рисунок 74 – Расположение дополнительных БС на горизонтальном плане в перегонах: Улица Старокачаловская – Бунинская аллея

На рисунке 75 показаны зависимости уровней потерь мощности PL при подключении поезда ко второй по мощности БС (если оптимальная БС экранирована) от координаты до (красная кривая) и после (синяя кривая) установки дополнительных БС. На них видно, что дополнительные БС исправили проблемы недостаточного покрытия.

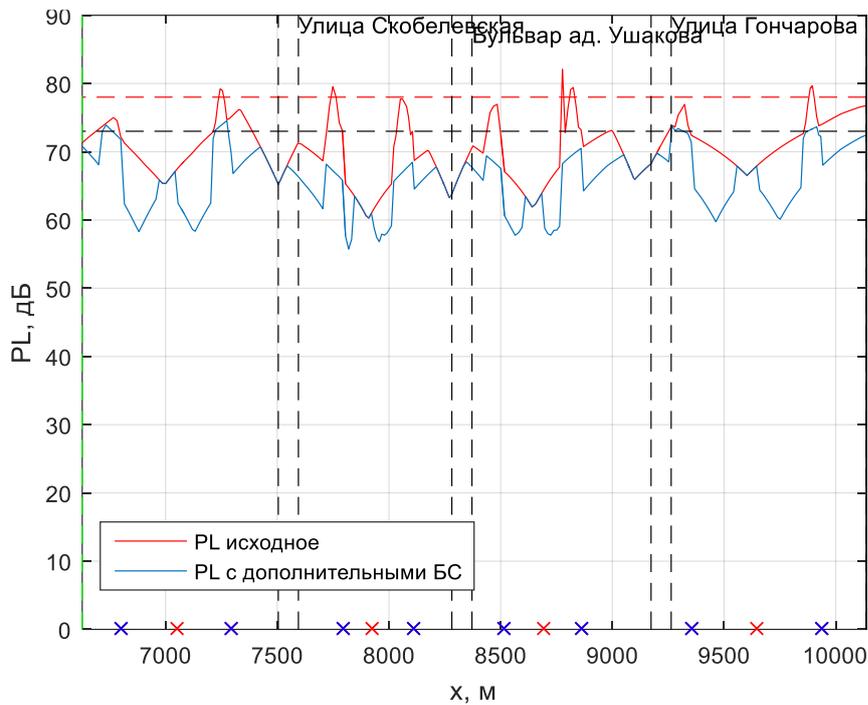


Рисунок 75 – Сравнение зависимостей потерь сигнала от координаты на открытом участке 1-го пути до и после установки дополнительных БС

На рисунке 76 приведены результаты повторного анализа нагрузки БС, максимальной населенности БС и средней населенности БС для открытого участка Бутовской линии после установки дополнительных БС. На рисунке 76 видно, что средняя населенность большинства БС снизилась.

БС с максимальной средней населенностью в большинстве случаев располагаются около станций, что логично, так как часто к таким БС подключается и поезд, который стоит на станции и подключается к этой БС через антенну головного вагона, так и поезд, который до этого отъехал от станции и уже движется по следующему перегону и подключается к этой БС через антенну хвостового вагона.

Повторный анализ нагрузки БС после установки дополнительных БС показывает, что на открытом участке средняя населенность немного снизилась из-за перераспределения трафика между существующими и новыми БС, ситуация перекрытия эффективной БС не приведет к превышению PL допустимого порогового значения (таблица 18).

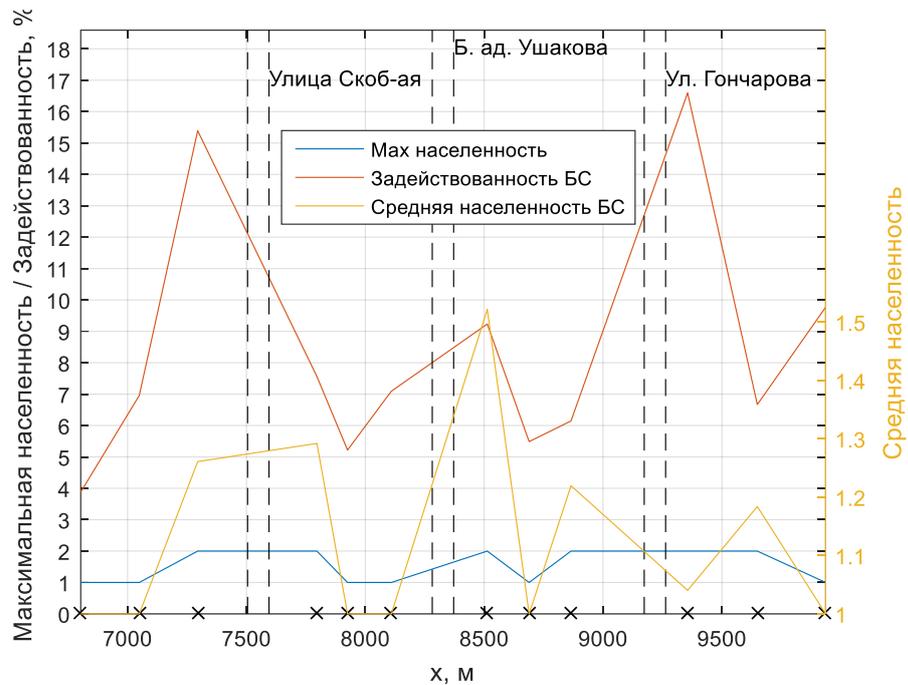


Рисунок 76 – Результаты повторного анализа нагрузки БС на открытом участке линии после установки дополнительных БС

Таблица 18 – Результаты анализа открытого участка Бутовской линии

Параметр	Значение в текущей сети	Значение после установки доп. БС
Количество БС на участке	8	12
Вероятность полного экранирования БС	0%	0%
Средняя вероятность экранирования опт. БС	6%	5%
Максимальная вероятность экранирования опт. БС	22%	21%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	78%	86%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	22%	14%
Средняя населенность БС	1,2	1,13

Установка дополнительных БС на двупутном открытом участке снизила максимальную вероятность подключения в одной БС двух поездов с 21% до 14% и обеспечивала не превышение PL порогового значение даже при экранировании оптимальной БС.

В таблице 19 продублированы результаты из таблицы 14, для сравнения результатов анализа открытых и закрытых участков метрополитена.

Таблица 19 – Результаты анализа 1-го пути Калужско-Рижской линии

Параметр	Значение в текущей сети	Значение после установки доп. БС
Количество БС участке	50	58
Вероятность полного экранирования БС	0%	0%
Вероятность экранирования оптимальной БС	1,8%	0,7%
Вероятность подключения к БС 1 поезда	92,7%	95,2%
Вероятность подключения к БС 2 поездов	7,3%	4,8%
Средняя населенность БС	1,07	1,04

Сравнив результаты для участков открытого и закрытого типов, видно, что вероятность полного экранирования во всех случаях равна нулю, что говорит о нормальном соотношении интенсивности трафика на линиях и расстоянии между установленными БС. Средняя вероятность экранирования оптимальной БС, вероятность подключения к БС 2-х поездов и средняя населенность БС выше на открытом участке, так как он является двухпутным, а закрытая Калужско-Рижская линия является однопутной для каждого направления движения. Установка дополнительных БС на линии каждого типа снизила среднюю населенность в среднем на 4 % (2% для открытого участка и 6% для закрытого), на 40% вероятность подключения к одной БС 2-х поездов одновременно и вероятность экранирования оптимальной БС на 20% и 60% для открытого и закрытого участка, соответственно. Вероятность экранирования на открытом участке больше, чем для закрытого, но и расстановка БС на открытом участке выполнена таким образом, что переключение на неоптимальную БС не приведет к снижению скорости передачи данных.

4.5 Выводы по главе 4

В четвертой главе приведены примеры применения разработанного комплекса алгоритмов радиопланирования на линиях метрополитена Москвы, по которым можно сделать следующие выводы:

1. Продемонстрированы особенности проведения анализа для участков разного типа – закрытые однопутные линии и открытые двухпутные. Показано, что вероятность подключения к одной БС двух поездов одновременно на 30% выше на открытом участке, средняя населенность одной БС минимум на 10% выше на открытых участках;
2. Показана эффективность применения разработанного комплекса алгоритмов для решения задачи радиопланирования для определения оптимальной расстановки БС по сравнению с другими методами определения положений БС вдоль тоннелей. Эффективность выражается в снижении плотности БС максимум на 30%, в среднем на 12%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационного исследования были разработан комплекс алгоритмов для решения задачи определения оптимальной расстановки базовых станций в тоннелях метрополитена по критерию обеспечения требуемого качества сигнала на протяжении всего времени движения поезда по линии при использовании минимального количества базовых станций. По итогу выполнения диссертационного исследования были достигнуты следующие основные результаты:

1. Обоснована, разработана и экспериментально исследована математическая модель затухания сигнала диапазона 5–6 ГГц в тоннелях метрополитена. Показано, что предложенная модель затухания сигнала рассчитывает величину PL при распространении между точками передатчика и приемника на участках метрополитена различного типа со средней погрешностью 5 дБ относительно величин, измеренных экспериментально;
2. Разработан алгоритм оптимальной расстановки БС вдоль линий метрополитена, обеспечивающий непрерывное покрытие беспроводной сетью требуемого участка с помощью минимального количества БС;
3. Разработан симулятор беспроводного трафика в канале «поезд – БС» для мониторинга и анализа качества работы организованной беспроводной сети. Показано, что разработанный симулятор позволяет анализировать беспроводную сеть, на наличие участков недостаточного покрытия;
4. Разработан комплекс алгоритмов, состоящий из модели затухания сигнала, алгоритма расстановки БС и симулятора беспроводного трафика, применение которого при радиопланировании беспроводных сетей в метрополитене позволяет снизить количество требуемых БС максимум на 30% по сравнению с существующими методами, в среднем на 12%;

5. Разработан автоматизированный алгоритм предсказания PL на основе методов машинного обучения. Показано, что средняя погрешность предсказываемых значений PL составляет 2 дБ относительно значений, рассчитанных с помощью разработанной математической модели затухания, при сокращении времени выполнения радиопланирования в среднем в 7 раз.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БС – базовая станция

ГО – геометрическая оптика

Гц – Герц

дБ – децибелы

дБи – изотропный децибел

дБм – децибел на милливатт

ДН – диаграмма направленности

КАМ – квадратурная амплитудная модуляция

КУ – коэффициент усиления антенны

GTD/UTD – Geometrical theory of diffraction/ Uniform geometrical theory of diffraction

– геометрическая теория дифракции/единая геометрическая теория дифракции

KNN – K-Nearest Neighbor – метод K-ближайших соседей

LDA – Linear Discriminant Analysis – линейный дискриминантный анализ

LOS – Light-Of-Sign – условия распространения с наличием луча прямой видимости между точками передатчика и приемника

MIMO – Multiple Input Multiple Output – схема приема-передачи с множественными входами и выходы

ML – Machine Learning – машинное обучение

NLOS – Non-Light-Of-Sign – условия распространения с отсутствием луча прямой видимости между точками передатчика и приемника

PL – Path Loss – величина потерь мощности сигнала

PL-порог – обозначение для порогового значения PL в алгоритме расстановки БС

RSSI – Received Signal Strength Indicator – индикатор приемной мощности сигнала

Rx – Receiver – приемник

SVR/ SVM – Support Vector Regression/Machine – метод опорных векторов

Tx – Transceiver – передатчик

X-конец – обозначение координаты конца перегона

X-начало – обозначение координаты начала перегона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адеркина, А. А. Измерение и анализ ослабления сигнала диапазона 5 ГГц при распространении вдоль участков метрополитена различного типа / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – № 1 (41). – С. 33-45.
2. Адеркина, А. А. Комплекс программных инструментов для решения задач радиопланирования / А. А. Адеркина, А. Ю. Трушанин, М. А. Шашанов [и др.] // Информационные системы и технологии. – 2022. – №4(132). – С. 5-15.
3. Адеркина, А. А. Радиопланирование систем беспроводной связи в тоннелях метрополитена / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2020. – № 1. – С. 41-53.
4. Адеркина, А. А. Разработка автоматизированного программного инструмента на основе методов машинного обучения для решения задач радиопланирования на участках метрополитена / А. А. Адеркина, А. С. Сеницын // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 5(120). – С. 32-39
5. Адеркина, А. А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2018). – Москва, 2018. – С. 147-151.
6. Адеркина, А. А. К вопросу разработки методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Материалы 13-й международной научно-технической конференции: в 2-х томах / Редкол.: А.Г. Самойлов [и др.]. – Владимир: ВлГУ. – 2019. – Т. II. – 280 с. – ISBN 978-5-905527-35-7.
7. Адеркина, А. А. К вопросу разработки методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Сборник докладов 74-й Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио: сб.

докладов. – СПб.: АНО ДПО «Аничков мост»; ООО «Триста точек», 2019. – 435 с. – ISBN 978-5-9908491-6-7.

8. Адеркина, А. А. Применение методов машинного обучения для предсказания величины потерь мощности сигнала при распространении в тоннелях метрополитена / А. А. Адеркина, А. С. Сеницын // Труды XXVI научной конференции по радиофизике: сборник тезисов конференции. – Нижний Новгород, 2022. – С. 276-279

9. Адеркина, А. А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Труды XXI научной конференции по радиофизике ННГУ: сборник тезисов конференции. – Нижний Новгород, 2017. – С. 189-192.

10. Адеркина, А. А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 46-50.

11. Адеркина, А. А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Сборник тезисов XXIII Нижегородской сессии молодых ученых. – Нижний Новгород, 2018.

12. Адеркина, А. А. Расширение методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адеркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Труды XXII научной конференции по радиофизике ННГУ: сборник тезисов конференции. – Нижний Новгород, 2018. – С. 264-267.

13. Амелехина, Е. Проклятье щелевого фидера. 600 миллионов рублей на излучающий кабель, скорее всего, уйдет иностранцам [Электронный ресурс] / Е. Амелехина // Ruscable. – Режим доступа: https://www.ruscable.ru/article/proklyate_shelevogo_fidera_600_millionov/

14. Асимптотические методы в теории волн. Учебно-методическое пособие / Сост. Н. Д. Миловский. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 138 с.

15. Басс, Ф. Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
16. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. С. Н. Бреуса [и др.]; под ред. Г. П. Мотулевич. – 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
17. Бреховских, Л. М. Волны в слоистых средах: учебное пособие для вузов / Л. М. Бреховских; Академия наук СССР, Акустический институт. – М.: Издательство АН СССР, 1957. – 501[2] с.
18. Войнов, Б. С. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений: в 2 томах / Б. С. Войнов, В. Н. Бугров, Б. Б. Войнов; Российская акад. наук, М-во образования и науки РФ. – 2-е доп. науч. электронное изд. – М.: Наука, 2007.
19. Волков, В. П. Тоннели и метрополитены: [учебник для вузов ж.-д. транспорта] / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова; [Под ред. В. П. Волкова]. – Москва: Транспорт, 1964. – 631 с.
20. Горелик, Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику: учебное пособие для студентов высших учебных заведений по направлению подготовки "Прикладная математика и физика" / Г. С. Горелик; под ред. С. М. Рытова. – 3-е изд. – Москва: Физматлит, 2008. – 655, [1] л. портр.: ил.; 23 см. – (Физтехковский учебник). – ISBN 978-5-9221-0776-1.
21. Ермолаев, В. Т. Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман, И. А. Аверин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2004. – № 1. – С. 127-137.
22. Ермолаев, В. Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи / В. Т. Ермолаев, А. Г. Флакман. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – 368 с.
23. Камишин, М. Беспроводное подземелье радиопланирование [Электронный ресурс] / М. Камишин // Метро. Новости. – Режим доступа: <http://news.metro.ru/mnov1208.html>

24. Каценеленбаум, Б. З. Проблема аппроксимируемости электромагнитного поля / Б. З. Каценеленбаум // Успехи физических наук. – 1994. – Т. 164, № 9. – С. 983-993.
25. Келлехер, Д. Д. Основы машинного обучения для аналитического прогнозирования. Алгоритмы, рабочие примеры и тематические исследования / Д. Д. Келлехер, Б. Мак-Нейми, А. Д'Арси. – М.: Диалектика-Вильямс, 2019. – 656 с. – ISBN 978-5-6040044-9-4.
26. Кинг, Р. Антенны в материальных средах: в 2-х книгах / Р. Кинг, Г. Смит; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук В. Б. Штейншлейгера. – Москва: Мир, 1984
27. Королев, И. WiFi-революция в метро: кто и как ее устроил [Электронный ресурс] / И. Королев // Метро. Новости. – Режим доступа: <http://news.metro.ru/cn170215.html>
28. Ландсберг, Г. С. Оптика : [пер. с рус.] / Г. С. Ландсберг. – М.: Мир, 1954. – 728 с.
29. Майзельс, Е. Н. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей / Е. Н. Майзельс, В. А. Торгованов; под ред. М. А. Колосова. – Москва: Сов. радио, 1972. – 232 с.
30. Михаил Миньковский, «МаксимаТелеком»: Скорость Wi-Fi в московском метро повысится до 200 Мбит/с [Электронный ресурс] // CNews. – Режим доступа: https://www.cnews.ru/articles/2019-12-04_mihail_minkovskijmaksimatelekom
31. Московский метрополитен [Электронный ресурс] // TAdviser. – Режим доступа: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F:%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD
32. Мюллер, А. Введение в машинное обучение с помощью Python: руководство для специалистов по работе с данными: [полноцветное издание] / А.

Мюллер, С. Гвидо; [перевод с английского и редакция А. В. Груздева]. – М. [и др.]: Диалектика, 2017. – 472 с. – ISBN 978-5-9908910-8-1.

33. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 543 с. – ISBN 5-02-014033-3.

34. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1991. – 301 с. – ISBN 5-283-04513-7.

35. Объем трафика сети Wi-Fi московского метро в 2017 году увеличился в 1,5 раза [Электронный ресурс] // ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/4949300>

36. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер; пер. с англ. под ред. С. Ф. Боева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Техносфера, 2012. – 1046 с. – (Мир электроники; Вып. XVII (15)). – ISBN 978-5-94836-329-5.

37. Основы теории антенн и распространения радиоволн / В. П. Кубанов, В. А. Ружников, М. Ю. Сподобаев, Ю. М. Сподобаев; под ред. В. П. Кубанова. – Самара: Офорт, 2016. – 253 с. – ISBN 978-5-473-01060-2.

38. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Т. 3: Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использованием радиочастотного спектра / Под ред. М. А. Быховского. – М.: URSS; КРАСАНД, 2012. – 367 с. – ISBN 978-5-396-00402-3.

39. Панельная антенна RGA-P5-19 [Электронный ресурс] // Радио Гигабит Системс. – Режим доступа: <http://radiogigabitsys.ru/rga-p5>

40. Петров, Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для курсантов высших военных учебных заведений, обучающихся по специальностям направления "Радиотехника" / Б. М. Петров. – М.: Радиотехника, 2007. – 408 с. – ISBN 978-5-88070-147-6.

41. Плас, Дж. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение / Дж. Вандер Плас; [перевела с английского И. Пальти]. – Санкт-

Петербург [и др.]: Питер, 2018. – 572 с. – (Бестселлеры O'Reilly). – ISBN 978-5-4461-0914-2.

42. Попов, А. WiFi в метро Москвы – техническое послевкусие [Электронный ресурс] / А. Попов // Russos. – Режим доступа: <https://russos.livejournal.com/1102641.html>

43. Предварительное обследование и радиопланирование [Электронный ресурс] // Современные беспроводные решения. – Режим доступа: https://wifi-solutions.ru/pred_obsledovanie/#:~:text=%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20E2%80%93%20D1%8D%D1%82%D0%BE%20D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D1%8B%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0%20D0%BF%D0%BE,%D0%B2%D0%B7%D0%B0%D0%B8%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D1%85%20D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%85%20D0%B8%20D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B8%20D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B0

44. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 797 с. – ISBN 5-256-01434-X.

45. Распространение радиоволн / О. И. Яковлев [и др.]; под ред. О. И. Яковлева. – М.: URSS: ЛЕНАНД, 2009. – 491 с. – ISBN 978-5-9710-0183-6.

46. Ревинская, О. Г. Основы программирования в MatLab: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / О. Г. Ревинская. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. – 206 с. – ISBN 978-5-9775-3564-9.

47. Рекомендация МСЭ-R P.620-6*. Данные о распространении радиоволн, требующиеся для оценки координационных расстояний в диапазоне частот от 100 МГц до 105 ГГц (Вопрос МСЭ-R 208/3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://hugepdf.com/download/r-p620-6_pdf
48. Рубас, А. Московский подземный интернет [Электронный ресурс] / А. Рубас, А. Попов // NAG. – Режим доступа: <https://nag.ru/material/35939>
49. Свейгарт, Э. Автоматизация рутинных задач с помощью Python: практическое руководство для начинающих / Э. Свейгарт; [пер. с англ. А. Г. Гузикевича]. – М. [и др.]: Вильямс, 2016. – 584 с. – ISBN 978-5-8459-2090-4.
50. Седакин, Н. М. Элементы теории случайных импульсных потоков / Н. М. Седакин. – М.: Сов. радио, 1965. – 261 с
51. Сеницын, А.С. Изучение возможности применения методов машинного обучения в радиофизических задачах / А.А. Адеркина, А.С. Сеницын, М.В. Махлышев // Труды XXV научной конференции по радиофизике: сборник тезисов конференции. – Нижний Новгород, 2021. – С. 228-231.
52. Смит, С. Цифровая обработка сигналов: практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит; [пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева]. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 718 с. – (Серия "Схемотехника"). – ISBN 978-5-94120-145-7.
53. Сотовая связь в метро [Электронный ресурс] // Celnet. – Режим доступа: <http://celnet.ru/subwaynet.php>
54. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
55. Тюльпа, Д. Применение искусственного интеллекта в промышленности / Д. Тюльпа // САПР и графика. – 2020. – № 1. – С. 26-30.
56. Уфимцев, П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. Введение в физическую теорию дифракции / П. Я. Уфимцев; пер. с англ. А. В. Капцова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2012. – 372 с. – ISBN 978-5-9963-0634-3.

57. Финкельштейн, М. И. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн, В. Л. Мендельсон, В. А. Кутев; под ред. М. И. Финкельштейна. – Москва: Сов. радио, 1977. – 174 с.
58. Фитасов, Е. С. К вопросу моделирования канала распространения радиолокационных сигналов / Е. С. Фитасов, В. А. Односеццев, И. В. Душко [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 3. – С. 48-56.
59. Фитасов, Е. С. Система синхронизации времени и локального позиционирования на базе беспроводных сетей / Е. С. Фитасов, Д. Н. Ивлев, Н. С. Морозов [и др.] // Датчики и системы. – 2017. – № 8-9. – С. 20-26.
60. Фок, В. А. Проблемы диффракции и распространения электромагнитных волн / В. А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 517 с.
61. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика. Ч. 1: Электричество и магнетизм / В. И. Яковлев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: [б. и.]; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. – 346 с. – ISBN 978-5-4344-0349-8.
62. 3D News: 1,7 Пбайт в месяц: объем трафика в метро Москвы бьет рекорды [Электронный ресурс] // 3DNews – Daily Digital Digest. – Режим доступа: <https://3dnews.ru/1002618>
63. A new approach of the beam ray tracing with double diffraction, for outdoor propagation [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8321412>
64. A New Model for Predicting the Characteristic of RF Propagation in Rectangular Tunnel [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4772422>
65. Abdallah, A. A. A machine learning approach for localization in cellular environments / A. A. Abdallah, S. S. Saab, Z. M. Kassas // IEEE/ION position, location and navigation symposium (PLANS). – 2018. – P. 1223-1227.
66. Aguado, M. Simulation framework for performance evaluation of broadband communication architectures for next generation railway communication services [Electronic resource] / M. Aguado, E. Jacob, M. Berbineau [et al.] // 9th International

Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST). – Lille (France), 2009. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5399310>

67. Ai, B. Measurements and Analysis of Extra Propagation Loss of Tunnel Curve / B. Ai, K. Guan, Zh. Zhong [et al.] // IEEE Transactions on Vehicle Technology. – 2016. – Vol. 65 (4). – P. 1845-1858.

68. Aikio, P. Wideband radio channel measurements for train tunnels / P. Aikio, R. Gruber, P. Vainikainen // Proceedings of the 48th Vehicular Technology Conference (VTC'98). – Ottawa, 1998. – P. 460-464.

69. Alvizu, R. Matheuristic with machine-learning-based prediction for software-defined mobile metro-core networks / R. Alvizu, S. Troia, G. Maier [et al.] // Journal of Optical Communications and Networking. – 2017. – Vol. 9 (9). – P. D19-D30.

70. An Efficient Ray-Tracing Based Model Dedicated to Wireless Sensor Network Simulators for Smart Cities Environments [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9256262>

71. Baldo, N. Big Data Empowered Self Organized Networks / N. Baldo, L. Giupponi, J. Mangues-Bafalluy // European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference. – VDE, Barcelona, 2014. – P. 1-8.

72. Bartolomé, P. Site measurements for installation of an indoor radio communication system / P. Bartolome, G. Vallejo // IEEE 43rd Vehicular Technology Conference. – IEEE, 1993. – P. 57-60.

73. Bergstra, J. Random Search for Hyper-Parameter Optimization / J. Bergstra, Y. Bengio // Machine Learning Research. – 2012. – Vol. 13. – P. 281-305.

74. Binzer, T. Dominant Ray Paths for the Planning of Urban Radio Networks / T. Binzer, G. Wölfle, R. Hoppe [et al.] // 9th COST 259 MCM-Meeting. – 1999.

75. Binzer, T. Radio network planning with neural networks. Vehicular Technology Conference Fall 2000 / T. Binzer, F. M. Landstorfer // IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No. 00CH37152). – 2000. – Vol. 2. – P. 811-817.

76. Bouche, D. Asymptotic methods in electromagnetics / D. Bouche, F. Molinet, R. Mittra. – Springer, Berlin, Germany, 1997. – 548 p.

77. Briso-Rodriguez, C. Path Loss Modeling for Train-to-Train Communication in Subway Tunnels at 900/2400 MHz / C. Briso-Rodriguez, P. Fratilesco, Y. Xu // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18 (6). – P. 1164-1168.
78. Cell-Free at Millimeter Wave Frequency Simulation Using the Ray Tracing Method [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9135459>
79. Characterization and Modeling of a Wireless Channel at 2.4 and 5.8 GHz in Underground Tunnels [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4362352>
80. Chen, J. Learning radio maps for UAV-aided wireless networks: A segmented regression approach / J. Chen, U. Yatnalli, D. Gesbert // IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2017. – P. 1-6.
81. Cichon, D. J. Radio link simulations in high-speed railway tunnels [Electronic resource] / D. J. Cichon, T. Zwick, W. Wiesbeck // 1995 Ninth International Conference on Antennas and Propagation, ICAP '95 (Conf. Publ. No. 407). – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/640075>
82. Dai, L. Propagation-model-free base station deployment for mobile networks: Integrating machine learning and heuristic methods / L. Dai, H. Zhang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 83375-83386. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2990631
83. Dai, L. Propagation-model-free coverage evaluation via machine learning for future 5G networks [Electronic resource] / L. Dai, H. Zhang, Y. Zhuang // IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – 2018. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8580992>
84. Dalapati, P. Real-time collision handling in railway transportnetwork: an agent-based modeling and simulation approach / P. Dalapati, A. Padhy, B. Mishra [et al.] // Transportation Letters The International Journal of Transportation Research. – 2-17. – Vol. 11 (6). – P. 1-11.
85. Dengke, Zh. Network management mechanism of the high-speed rail way broadband communication system [Electronic resource] / Zh. Dengke, Zh. Changwen, Zh. Gang [et al.] // 4th IEEE International Conference on Network Infrastructure and

Digital Content. – Beijing (China), 2014. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7000342>

86. Djadel, M. Narrowband Propagation Characteristics at 2.45 and 18 GHz in Underground Mining Environments / M. Djadel, C. Despins, S. Affes // Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE. – 2002. – Vol. 2. – P. 1870-1874.

87. Dominguez-Bolano, T. Measurement-Based Characterization of Train-to-Infrastructure 2.6 GHz Propagation Channel in a Modern Subway Station / T. Dominguez-Bolano, J. Rodriguez-Pineiro, J. A. Garcia-Naya [et al.] // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 52814-52830.

88. Eurostat Statistics Explained: Railway passenger transport statistics – quarterly and annual data [Electronic resource] // European Commission website. – Mode of access: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data

89. FLUIDMESH 4500 MOBI [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.netmask.co/uploads/fluidmeshfm4500mobi-f3ea7c75f9.pdf>

90. Ganesh, R. Statistical modelling and computer simulation of indoor radio channel / R. Ganesh, K. Pahlavan // Communications Speech and Vision IEE Proceedings I. – 1991. – Vol. 138 (3). – P. 153-161.

91. Goldsmith, A. Wireless communications / A. Goldsmith. – Cambridge university press, 2005. – 673 p.

92. Guan, K. Measurement of distributed antenna system at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment / K. Guan, Z. D. Zhong, J. I. Alonso [et al.] // IEEE Transaction on Vehicular Technology. – 2012. – № 61. – P. 834-837.

93. Guan, K. Measurements and Analysis of Large-Scale Fading Characteristics in Curved Subway Tunnels at 920 MHz, 2400 MHz, and 5705 MHz / K. Guan, B. Ai, Zh. Zhong [et al.] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16 (5). – P. 2393-2405.

94. Guan, K. Statistic modeling for propagation in tunnels based on distributed antenna systems / K. Guan, Z. Zhong, B. Ai [et al.] // IEEE Antennas and Propagation

Society International Symposium (APSURSI). – 2013. – P. 1920-1921. – DOI: 10.1109/APS.2013.6711618

95. Hamada, T. Peer-to-Peer Traffic in Metro Networks: Analysis, Modeling, and Policies [Electronic resource] / T. Hamada, K. Chio, T. Chujo [et al.] // IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. – Seoul (South Korea), 2004. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1317683>

96. Haslett, C. Essentials of Radio Wave Propagation / C. Haslett – Cambridge University Press, Ney York, US, 2008. – 201 p.

97. He, R. Propagation channel measurements and analysis at 2.4 GHz in subway tunnels / R. He, Zh. Zhong, K. Guan [et al.] // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2013. – Vol. 7 (11). – P. 934-941.

98. Hou, X. Research on radio network planning and optimization in TETRA digital trunking system / X. Hou, H. Shu // IEEE Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. – 2012. – P. 821-824. – DOI: 10.1109/IMCCC.2012.198

99. Hrovat, A. A survey of radio propagation modeling for tunnels [Electronic resource] / A. Hrovat, G. Kandus, T. Javornik // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – № 16. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6616687>

100. Intelligent ray tracing for the propagaiton prediction [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7152831>

101. Kim, H.-T. UTD solution for electromagnetic scattering by a circular cylinder with thin lossy coatings / H.-T. Kim, N. Wang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1989. – Vol. 37 (11). – P. 1463-1472.

102. Le, J. The top 10 machine learning algorithms every beginner should know [Electronic resource] / J. Le // Builtin. – Mode of access: https://builtin.com/data-science/tour-top-10-algorithms-machine-learning-newbies?utm_campaign=News&utm_medium=Community&utm_source=DataCamp.com

103. Lin, K. A Hardware-in-the-loop Simulation Method of the Network Performance of High-speed Railway Mobile Communication System [Electronic resource] / K. Lin, Zh. Zhong, L. Xiong [et al.] // 6th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). – Harbin (China), 2011. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6158344>

104. Lio, Y. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey / Y. Lio, A. Chazal, Ch.-X. Wang [et al.] // Science China Information Sciences. – 2017. – Vol. 60 (10). – P. 1-17.

105. Liu, Y. An Intelligent train regulation algorithm for metro using deep reinforcement learning [Electronic resource] / Y. Liu, T. Tang, L. Yue [et al.] // 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). – Maui, HI (USA), 2018. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569419>

106. Magtoto, J. Real-Time Traffic Data Collection and Dissemination from an Android Smartphone using Proportional Computation and FreeSim as a Practical Transportation System in Metro Manila [Electronic resource] / J. Magtoto, A. Roque // TENCON IEEE Region 10 Conference. – Cebu (Philippines), 2012. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6412332>

107. McKinsey&Company: Elements of success: Urban transportation system of 24 global cities [Electronic resource] // Mckinsey. – Mode of access: https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems_e-versions.ashx

108. Measurement of the influence of antenna pattern on radio frequency propagation in a concrete tunnel [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8304958>

109. Measurements and Ray Tracing Simulations for Non-Line-of-Sight [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8744481>

110. Menolascino, R. Software Tools for the Optimisation of Resources in Mobile Systems / R. Menolascino, M. Pizarroso // Storms Project Final Report. – 1999. – P. 1-27.
111. Millimeter wave high gain lens antenna with reduced focus distance [Electronic resource]. – Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7481258?casa_token=p_78sqZRtrgAAAAA:mygj_Fkm5YPsZeonJfnwnJciTIvMoeofJ2I0icNUCeO2frmCN_UNPp3h7KiVLc9MIq1ssJKB_sSr
112. Modeling RF propagation in tunnels [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6711616>
113. Moraitis, N. Machine Learning-Based Methods for Path Loss Prediction in Urban Environment for LTE Networks [Electronic resource] / N. Moraitis, L. Tsipi, D. Vouyioukas // 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – Thessaloniki (Greece), 2020. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9253369>
114. Moreta, C. E. G. Prediction of digital terrestrial television coverage using machine learning regression / C. E. G. Moreta, M. R. C. Acosta, I. Koo // IEEE Trans. Broadcast. – 2019. – Vol. 65 (4). – P. 702-712.
115. Moysen, J. A machine learning enabled network planning tool [Electronic resource] / J. Moysen, L. Giupponi, J. Manges-Bafalluy // IEEE 27th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC). – 2016. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/311895282_A_machine_learning_enabled_network_planning_tool
116. Multilayer Wall Correction Factors for Indoor Ray-Tracing Radio Propagation Modeling [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8852823>
117. Multiple-feed integrated lens antenna with continuous scanning range [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7928857>

118. Nai, W. Analysis of Train and Station Use Efficiency for Shanghai Metro Line 16 with Multi Mode Trains Mixed Running in Different Ratio [Electronic resource] / W. Nai, D. Dong, Sh. Chen [et al.] // International Conference on Services Systems and Services Management, ICSSSM. – Shanghai (China), 2012. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6252307>
119. Navabi, S. Predicting wireless channel features using neural networks / S. Navabi, C. Wang, O. Y. Bursalioglu [et al.] // IEEE international conference on communications (ICC). – IEEE, 2018. – P. 1-6.
120. Pathak, P. A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface / P. Pathak, W. Burnside, R. Marhefka // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1980. – Vol. 28 (5). – P. 631-642.
121. Pathak, P. An asymptotic analysis of the scattering of plane waves by a smooth convex cylinder / P. Pathak // Radio Science. – 1979. – Vol. 14 (3). – P. 419-435.
122. Politanskyi, R. Application of artificial intelligence in cognitive radio for planning distribution of frequency channels / R. Politanskyi, M. Klymash // 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). – 2019. – P. 390-394.
123. Popescu, I. Ann prediction models for outdoor environment / I. Popescu, D. Nikitopoulos, P. Constantinou [et al.] // 17th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. – IEEE, 2006. – P. 1-5.
124. Popoola, S. I. Optimal model for path loss predictions using feed-forward neural networks / S. I. Popoola, E. Adetiba, A. A. Atayero [et al.] // Cogent Eng. – 2018. – Vol. 5 (1). – P. 1-18.
125. Popoola, S. I. Outdoor path loss predictions based on extreme learning machine / S. I. Popoola, S. Misra, A. A. Atayero // Wireless Pers. Commun. – 2018. – Vol. 99 (1). – P. 441-460.
126. Popov, A. V. Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation [Electronic resource] / A. V. Popov, N. Y. Zhu // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – № 48. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/898773/metrics#metrics>

127. Product data sheet of RADWIN RW-9041-5002 antenna, 2012 [Electronic resource] // Inetdeal. – Mode of access: https://www.inetdeal.com/-pdf/Radwin_RW_9401_5002/RW-9401-5002.pdf
128. Raj, N. Indoor RSSI prediction using machine learning for wireless networks / N. Raj // International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS). – 2021. – P. 372-374.
129. Ranjan, A. Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments [Electronic resource] / A. Ranjan, H. B. Sahu, P. Misra // Measurement. – 2020. – Vol. 149. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119308462?via%3Dihub>
130. Rappaport, T. S. Wireless communications: principles and practice / T. S. Rappaport. – New Jersey: prentice hall PTR, 2001. – 707 p.
131. Ray tracing simulations for millimeter wave propagation in 5G wireless communications [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8072993>
132. Ray Tracing Simulations in Millimeter-Wave Vehicular Communications [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8904154>
133. Roullier-Callaghan, A. A radio coverage and planning tool / A. Roullier-Callaghan // 6th IEEE High Frequency Postgraduate Colloquium (Cat. No. 01TH8574). – 2001. – P. 35-40 -. DOI: 10.1109/HFPSC.2001.962156
134. Rytov, S. Principles of Statistical Radiophysics 1. Elements of Random Process Theory / S. Rytov, Y. Kravtsov, V. Tatarskii. – Springer Berlin Heidelberg, 1987. – 253 p.
135. Rytov, S. Principles of Statistical Radiophysics 2. Correlation Theory of Random Processes / S. Rytov, Y. Kravtsov, V. Tatarskii. – Springer Berlin Heidelberg, 1988. – 234 p.
136. Rytov, S. Principles of Statistical Radiophysics 3. Elements of Random Fields / S. Rytov, Y. Kravtsov, V. Tatarskii. – Springer Berlin Heidelberg, 1989. – 239 p.

137. Rytov, S. Principles of Statistical Radiophysics 4. Wave Propagation Through Random Media / S. Rytov, Y. Kravtsov, V. Tatarskii. – Springer Berlin Heidelberg, 1989. – 188 p.

138. Simulation of TD-LTE planning based on ray tracing model [Electronic resource] // Research Gate. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/343716895_Simulation_of_TD-LTE_planning_based_on_ray_tracing_model

139. Specifications of MARS MA-WA52-DP24 antenna Specifications of MARS MA-WA52-DP24 antenna [Electronic resource] // Mars-antennas. – Mode of access: <https://mars-antennas.com/product/ma-wa52-dp24/>

140. Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove, S. C. Hagness. – 3rd ed. – Norwood: Artech House, 2005. – 1038 p.

141. Thang, V. N. Machine Learning for Wideband Localization / V. N. Thang, J. Youngmin, Sh. Hyundong [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33 (7). 0 P. 1357-1380.

142. Timoteo, R. D. A. A proposal for path loss prediction in urban environments using support vector regression / R. D. A. Timoteo, D. Cunha, G. D. C. Cavalcanti // Proc. The Tenth Advanced Int. Conf. on Telecommunications (AICT'14). – 2014. – P. 119-124.

143. Tolstrup, M. Indoor Radio Planning. A Practical Guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE / M. Tolstrup. – Chichester: John Wiley & Sons, 2011. – 480 p.

144. Turin, G. L. A statistical model of urban multipath propagation / G. L. Turin, F. D. Clapp, T. L. Johnston [et al.] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1972. – Vol. 21 (1). – P. 1-9.

145. Vallejo-Cabrejas, G. Application of radio channel modelling to a planning tool in a mobile radio indoor communication system / G. Vallejo-Cabrejas, P. Batolome-Pascual // IEEE 43rd Vehicular Technology Conference. – 1993. – P. 219-222.

146. Van Nguyen, T. Machine learning for wideband localization / T. Van Nguyen, Y. Jeong, H. Shin [et al.] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33 (7). – P. 1357-1380. – DOI: 10.1109/JSAC.2015.2430191

147. Wang, C.-X. Channel measurements and models for high-speed train wireless communication systems in tunnel scenarios: a survey [Electronic resource] / C.-X. Wang, A. Ghazal, B. Ai [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – № 18. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7355284/authors#authors>

148. Wang, Zh. The Design and Implementation of the Metro Driving Simulation System Based on Virtual Reality [Electronic resource] / Zh. Wang, Y. Liu, X. Hei // IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings. – Beijing (China), 2013. – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6696274>

149. Wi-Fi в метро: архитектура сети и подземные камни [Электронный ресурс] // Хабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/maximatelecom/blog/332538/>

150. Zappone, A. Modelaided wireless artificial intelligence: embedding expert knowledge in deep neural networks for wireless system optimization / A. Zappone, M. Di Renzo, M. Debbah [et al.] // IEEE Veh. Technol. Mag. – 2019. – Vol. 14 (3). – P. 60-69.

151. Zhang, Y. Path loss prediction based on machine learning: principal method and data expansion / Y. Zhang, J. Wen, G. Yang [et al.] // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9 (9). – P. 1908.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



Общество с ограниченной ответственностью «Радио Гигабит»
(ООО «Радио Гигабит»)

603105, г. Нижний Новгород, ул. Ошарская, д. 95, к. 2
ИНН 7702769294

Акт о внедрении

Настоящим подтверждаю, что результаты работы Адёркиной А.А., включенные в диссертационное исследование на тему «Разработка и исследование алгоритмов радиопланирования беспроводных сетей в метрополитене» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при решении практических задач при радиопланировании участков метрополитенов, выполняемых ООО «Радио Гигабит» по заказу АО «МаксимаТелеком».

Генеральный директор
ООО «Радио Гигабит»




Ссорин В.Н.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор ННГУ им. Н.И. Лобачевского

по научной работе

М.В. Иващенко

« 22 » // 2022 г.

АКТ

о внедрении результата диссертационной работы
Адёркиной Анастасии Александровны «Разработка и исследование алгоритмов
радиопланирования беспроводных сетей в метрополитене», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности
«2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Акт составлен в том, что результаты диссертационного исследования А.А. Адёркиной внедрены в учебную и научно-исследовательскую работу на кафедре радиотехники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Внедрены следующие результаты диссертационной работы:

1. Алгоритм расстановки базовых станций и расчета величины затухания на основе методов машинного обучения в рамках лабораторной работы по курсу «Методы алгоритмизации и программирования»;
2. Исследование алгоритмов расстановки базовых станций расчета величины затухания на основе методов машинного обучения в рамках научно-исследовательской работы студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем (специалитет)» специализации «Системы подвижной цифровой защищенной связи».

Заведующий кафедрой радиотехники
ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
доктор технических наук, доцент

Евгений Сергеевич Фитасов

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ
ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022681803

**Программа для ЭВМ выполняющая расчет величины
потерь мощности сигнала между двумя точками**

Правообладатель: *Адёркина Анастасия Александровна (RU)*

Автор(ы): *Адёркина Анастасия Александровна (RU)*



Заявка № **2022681135**

Дата поступления **31 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 ноября 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан с помощью электронной подписи
Сертификат 60460079, С-0000044145257
Ключевое слово: ЭВМ
Дата: 2022.11.16 10:05:00

Ю.С. Зубов