

На правах рукописи



Адёркина Анастасия Александровна

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

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникации

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена на кафедре радиотехники в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского (Университет Лобачевского, ННГУ).

Научный руководитель:	Фитасов Евгений Сергеевич доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники ННГУ, г. Нижний Новгород
Официальные оппоненты:	Туляков Юрий Михайлович доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных и профессиональных дисциплин Волго-Вятского филиала Московского технического университета связи и информатики (ВВФ МТУСИ) Самойлов Сергей Александрович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехника и радиосистемы» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)
Ведущая организация:	Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»)

Защита состоится 22 февраля 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534238, E-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан 21 декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИССЕРТАЦИИ

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 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 натуральных 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования с освещением текущего состояния проблемы в области интеллектуальных систем радиопланирования в метрополитене при развертывании беспроводных сетей. Сформулирована научная проблема, определены цели и задачи исследования, её объект и предмет, методическая база, научная новизна и практическое значение, определены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержится описание разработки специальной математической модели распространения радиоволн диапазона 5–6 ГГц в тоннелях

метрополитена. Модель основывается на методе геометрической оптики (ГО) и учитывает как геометрические, так и физические характеристики стен тоннелей.

В условиях реального тоннеля при каждом отражении луча от стены только часть излучения отражается в зеркальном направлении, остальная часть поглощается материалами стен и рассеивается под другими углами (это излучение предполагается потерянным и далее не учитывается). Для моделирования отражения волн от стен тоннеля была построена специальная упрощённая модель самой стены, которая состоит из двух гладких границ раздела сред и переходного слоя (толщиной десятки сантиметров).

В качестве материала переходного слоя рассеивателя используется модель материала, отличающегося от воздушной среды наличием относительно небольшой проводимости. Описанная модель стены имеет два параметра: величину проводимости эффективного материала переходного слоя и толщину переходного слоя. Данные параметры, выбираются по результатам измерений.

Подход геометрической оптики (ГО) был выбран для модели распространения, так как он имеет достаточно высокую точность предсказания уровня потери мощности сигнала при его распространении в замкнутом пространстве. В основе разработанной модели лежит алгоритм трассировки лучей. Для каждого из пришедших в точку приёма лучей в каждой из двух плоскостей расчёта определяется величина затухания, состоящая из следующих компонент:

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

где $PL_k^{(h/v)}$ – суммарное затухание k -го луча в горизонтальной (h) или вертикальной (v) плоскости в дБ, PL_{GO} – величина затухания по законам ГО, PL_{refl} – суммарная величина затухания вследствие потерь на отражениях от стен, G_{TX} – коэффициент усиления передающей антенны, G_{RX} – коэффициент усиления приёмной антенны.

Величина ГО затухания в простейшем случае, если луч не испытывает ни одного отражения (луч является лучом прямой видимости):

$$PL_{GO} \sim 10 \cdot \lg(d),$$

где d – расстояние вдоль луча.

В общем случае с многочисленными актами отражениями в сумме по всем актам отражения получается следующее выражение:

$$PL_{GO} = \sum_{i=0}^N PL_i \sim 10 \lg(l_0) + \sum_{i=1}^N 10 \lg \left| \frac{\rho_n + l_n}{\rho_n} \right| =$$

$$10 \lg \left| l_0 \frac{(\rho_1 + l_1)}{\rho_1} \dots \frac{(\rho_N + l_N)}{\rho_N} \right|,$$

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.

Величина затухания $PL_{refl}^{(n)}$ для одного акта отражения рассчитывается следующим образом:

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

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

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, Z_1 – волновой импеданс воздуха, k_2 – волновое число переходного слоя, Z_2 – волновой импеданс переходного слоя, d – толщина переходного слоя (параметр модели стены) в метрах.

Величина затухания в каждой плоскости вычисляется по формуле:

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

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

После комбинирования рассчитанных величин затухания в двух плоскостях окончательная величина затухания сигнала между входом передающей антенны и выходом приемной антенн вычисляется по формуле:

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

где G_{TX}^{max} и G_{RX}^{max} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн в максимумах в дБи, $PL^{(\square)}$ – суммарное затухание, вычисленное в горизонтальной плоскости, в дБ, $PL^{(v)}$ – суммарное затухание, вычисленное в вертикальной плоскости, в дБ, f – частота несущей в Гц.

Также в первой главе приводятся результаты измерений в тоннелях и на открытых участках метрополитена для определения параметров стен тоннеля и для проверки применимости разработанной модели распространения сигнала.

По результатам измерений был определен коэффициент отражения сигнала от стен тоннеля метро, из которого были определены величины проводимости и толщины переходного слоя, которые являются параметрами модели распространения. Результаты измерений сравниваются с теоретической слоевой моделью. Теоретически предсказанные величины и измеренные значения отображены на графиках на Рис. 1. На итоговых графиках приведены погрешности измерений, которые обозначены вертикальными метками на каждой измеренной точке.

По результатам измерений и сравнения их с моделью отражения от эффективного слоя были определены параметры эффективного рассеивающего слоя. Толщина слоя принята равной 60 см и проводимостью $\sigma = 0.01$ См/м.

Следующие измерения были направлены на верификацию разработанной модели. На Рис. 2 приведены измеренные зависимости PL от расстояния между точками передатчика и приемника в тоннелях и на открытых(наземных) участках метрополитена. Также на Рис. 2 приведены кривые PL, рассчитанные разработанной моделью.

Сравнение затуханий, предсказанных моделью, и измеренных показывают, что в подавляющем большинстве случаев разница укладывается в 5–7 дБ. Для открытых участков разница значений затуханий, предсказанных моделью, и измеренных укладывается в 3–4 дБ.

По результатам калибровки модели можно заключить, что точность расчета PL для целей радиопланирования и расстановки базовых станций является приемлемой.

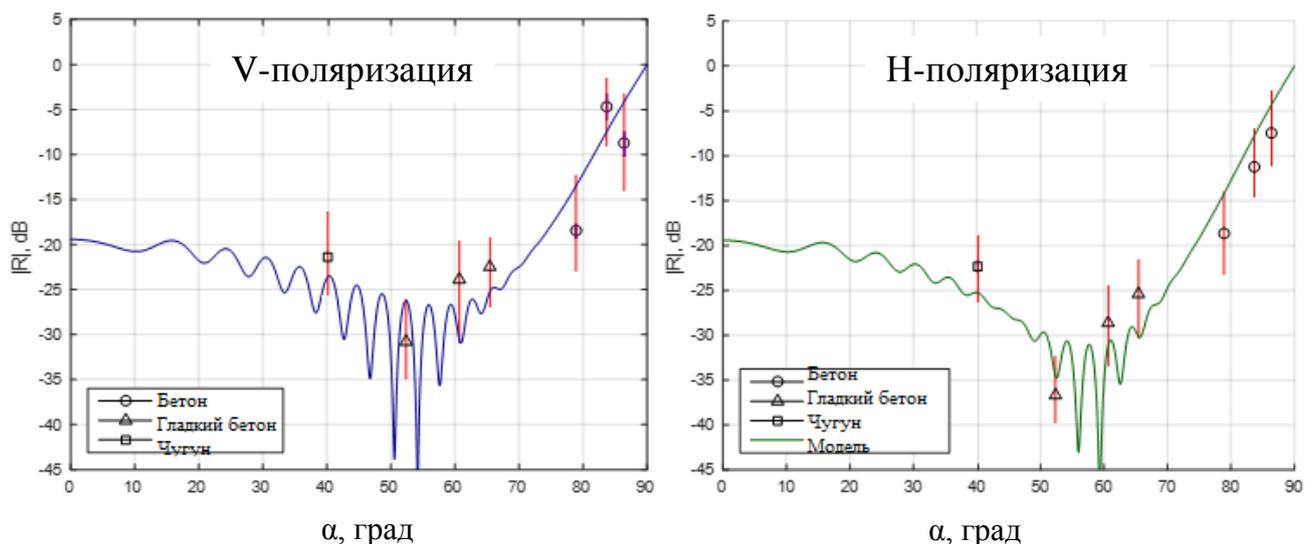


Рис. 1. Зависимости коэффициентов отражения от стен тоннелей в зависимости от угла падения для двух поляризаций антенн

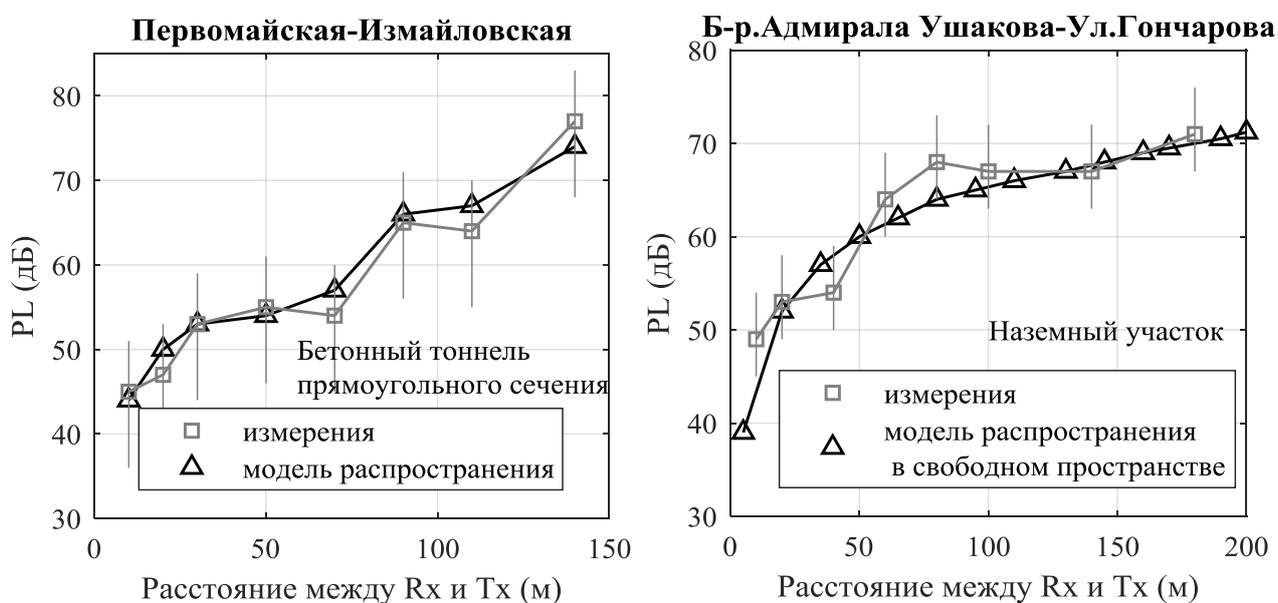


Рис. 2. Зависимость потерь сигнала от расстояния

Во **второй** главе приведено описание алгоритма расстановки БС. Целью данного алгоритма является получение расстановки БС, обеспечивающей непрерывное и равномерное покрытие путей метрополитена радиосетью с использованием минимально возможного количества БС.

Алгоритм размещения БС использует разработанную модель затухания сигнала. Выбор целевых координат БС для каждого перегона состоит из двух этапов. На первом этапе БС размещаются так, чтобы значения PL: от начала участка

до точки расположения первой БС, между последующей каждой парой соседних БС и между последней БС и концом участка, не превышали заданную величину порога.

Задачей второго этапа является введение поправок к выбранным координатам БС для выравнивания затухания между последней БС и концом перегона, которое не контролируется в ходе первого этапа, и затуханий между остальными БС, установленными в перегоне.

Под выравниваем затухания будем понимать обеспечение минимально возможного отклонения величин PL между каждыми двумя последовательными БС, 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:

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

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

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.

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

$$oprMetric = sign \cdot [\text{mean}(PLNew) - borderPL] - \text{std}(PLNew),$$

где $oprMetric$ – метрика оптимизации, $PLNew$ – массив новых значений затухания между БС в децибелах, $borderPL$ – потери между последней БС и концом участка в децибелах, $sign$ – параметр, равный 1 при сдвиге БС в сторону конца перегона и равный -1 при сдвиге БС в сторону начала перегона, $\text{mean}()$ и $\text{std}()$ – функции, вычисляющие среднее значение и среднеквадратическое отклонение по заданному вектору.

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

Примеры зависимостей PL на выходе первого и второго этапов приведены на Рис. 3. Видно, что на выходе этапа оптимизации отклонение величин PL от среднего значения меньше по сравнению с отклонением на выходе этапа первичной расстановки.

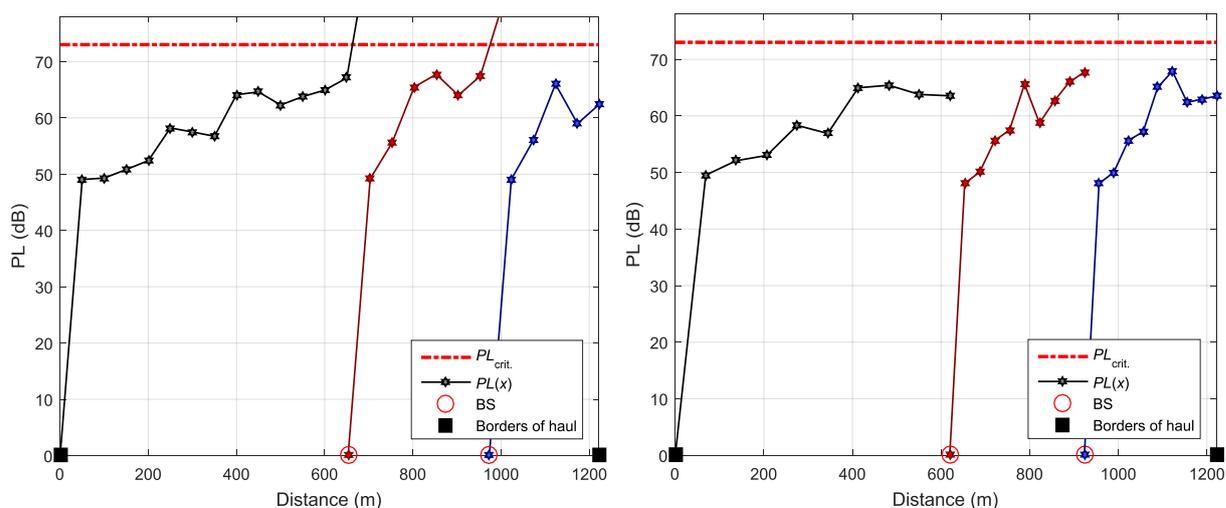


Рис. 3. Процедура первичной расстановки

Также во второй главе приведено описание симулятора беспроводного трафика в канале «поезд – базовая станция» в метрополитене.

Целью разработанного симулятора является проведение анализа качества беспроводной сети, организованной существующей на линии расстановкой БС или предложенной с помощью алгоритма расстановки, на обеспечение непрерывного доступа в сеть с максимальной скоростью передачи данных в условиях реальной эксплуатации.

В процессе эксплуатации условия на максимальную скорость передачи могут нарушаться из-за запаздывания оборудования при переключении от одной БС к другой, наличия на линии одновременно нескольких поездов, которые могут подключаться к общей БС или экранировать поезда от БС. Для учета перечисленных эффектов был разработан симулятор движения поездов в метро, являющийся частью симулятора беспроводного трафика, позволяющий оценить

качество работы сети БС в реальных условиях и сформировать рекомендации по её улучшению посредством установки дополнительных БС или перегруппировании БС, рекомендованных к установке.

В третьей главе описана разработка автоматизированного алгоритма радиопланирования. Для снижения времени вычисления разработанной модели расчета PL, а как следствие, снижения времени исполнения алгоритма расстановки и симулятора трафика, было предложено вместо вызова модели напрямую использовать обученный метод машинного обучения для предсказания PL по значениям геометрических параметров области распространения радиосигнала между точками передатчика и приёмника. При проведении исследований методов машинного обучения были рассмотрены наиболее популярные методы классификации. Для каждого исследуемого метода машинного обучения в Табл. 1 представлены результаты точности. Метрика точности показывает процент правильно предсказанных величин из всей выборки. В результате сравнения был выбран метод случайного леса для разработки алгоритма предсказания PL в метрополитене. Примеры применения автоматизированного алгоритма представлены на Рис. 4.

Разработанный алгоритм характеризуется достаточно высокой точностью: ошибка предсказания PL (разница между значениями полученными разработанной моделью затухания и предсказанными методом случайного леса) в тоннельном и наземном сценарии 1.9 дБ и 0.3 дБ соответственно, ошибка определения координат БС в тоннельном и наземном сценарии 107 и 75 м соответственно, ошибка итоговой плотности БС в тоннельном и наземном сценарии 0.5 и 0.3 БС/км соответственно.

Табл. 1. Сравнение моделей машинного обучения

Метод	Точность	Время выполнения процедуры радиопланирования для участка длиной 3 км сократилась с 1.5 часа при использовании разработанной модели затухания до
SVM	0.71	
Дерево решение	0.95	
Случайный лес	0.98	
К-ближайших соседей	0.94	
Логистическая регрессия	0.8	

1 минуты при использовании метода случайного леса. В среднем время сократилось в 7 раз.

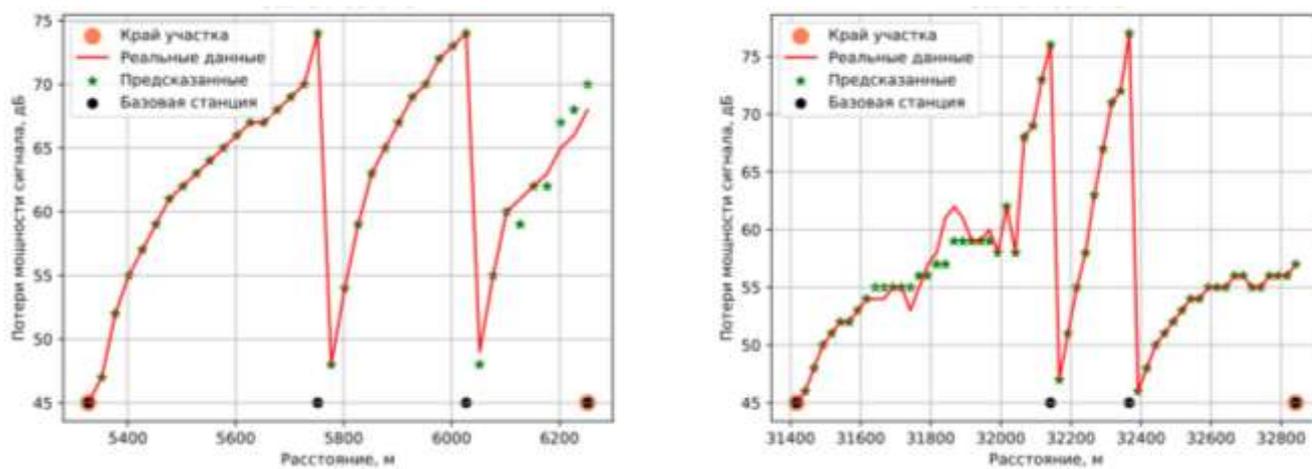


Рис. 4. Применение разработанного автоматизированного алгоритма на тоннельном (справа) и открытом (слева) участках

В **четвертой** главе приведены примеры применения разработанного программного комплекса (модель затухания, алгоритм расстановки, симулятор трафика, автоматизированный алгоритм предсказания PL) на линиях метрополитена различного типа, и показана эффективность его применения при радиопланировании беспроводных сетей в метрополитене.

Эффективность разработанного комплекса проиллюстрирована на примере количества БС, установленных на старых линиях метро Москвы первоначально по рекомендациям производителей оборудования, и количества БС, полученных с помощью разработанного комплекса, и приведена в Табл. 2.

Табл. 2. Сравнение количества БС в двух методах расстановки

Линия	Количество БС при первоначальной расстановке	Количество БС при использовании разработанного метода к расстановке БС
Замоскворецкая	52	42
Калужско – Рижская	50	43
Арбатско – Покровская	61	54

По приведенным значениям видно, что использование разработанного комплексного метода, снизило плотность БС на линиях метрополитена с сохранения требуемого уровня беспроводного соединения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации

1. Адёркина, А. А. Радиопланирование систем беспроводной связи в тоннелях метрополитена / А. А. Адёркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2020. – № 1. – С. 41-53
2. Адёркина, А. А. Измерение и анализ ослабления сигнала диапазона 5 ГГц при распространении вдоль участков метрополитена различного типа / А. А. Адёркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – № 1 (41). – С. 33-45
3. Адёркина, А. А. Комплекс программных инструментов для решения задач радиопланирования / А. А. Адёркина, А. Ю. Трушанин, М. А. Шашанов [и др.] // Информационные системы и технологии. – 2022. – №4(132). – С. 5-15

Научные публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus

4. Адёркина, А. А. Разработка автоматизированного программного инструмента на основе методов машинного обучения для решения задач радиопланирования на участках метрополитена / А. А. Адёркина, А. С. Сеницын // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 5(120). – С. 32-39

Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ и доклады в материалах научных конференций

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

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

7. Адёркина, А. А. Разработка методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адёркина, М. А. Шашанов, В. Ю. Шумилов [и др.] // Сборник тезисов XXIII Нижегородской сессии молодых ученых (технические, естественные, математические науки). – Нижний Новгород, 2018. – С. 74-76

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

9. Адёркина, А. А. К вопросу разработки методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адёркина, 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

10. Адёркина, А. А. К вопросу разработки методики радиопланирования систем беспроводной связи в метрополитене / А. А. Адёркина, 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

11. Адёркина, А. А. Изучение возможности применения методов машинного обучения в радиофизических задачах / А. А. Адёркина, А. С. Сеницын, Махлышев М.В. // Труды XXV научной конференции по

радиофизике ННГУ: сборник тезисов конференции. – Нижний Новгород, 2021. – С. 228-231

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

Свидетельства о государственной регистрации

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022681803. Программа для ЭВМ выполняющая расчет величины потерь мощности сигнала между двумя точками. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 16.11.2022. Правообладатель: Адёркина А.А.

Адёркина Анастасия Александровна

Разработка и исследование алгоритмов радиопланирования беспроводных сетей в метрополитене

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.12.2022 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100.

Издательство Нижегородского государственного университета им. Н. И.
Лобачевского (ННГУ)

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23