

Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Ваганова Анастасия Алексеевна

**ГИБРИДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
РАДИОВОЛН В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ
КОМПЛЕКСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН**

Специальность: 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления.

Научный руководитель: **Кисель Наталья Николаевна**
кандидат технических наук, доцент,

Официальные оппоненты: **Звездина Марина Юрьевна**
доктор физико-математических наук, доцент, ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону), управление по подготовке кадров высшей квалификации, ведущий научный сотрудник.

Бобков Николай Иванович
кандидат технических наук, АО «ВНИИ «Градиент» (г. Ростов-на-Дону), главный научный сотрудник сектора разработки и испытаний антенно-фидерных устройств.

Защита состоится «17» декабря 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.14 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1357193/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.14 по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Д», а также в формате pdf на e-mail: dvsemenihina@sfedu.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета ЮФУ801.02.14

доктор технических наук, доцент,

профессор ПИШ «Инженерия киберплатформ» ЮФУ

Семенухина Д. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование и разработка локальных систем беспроводной связи соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ (п. 3. Информационно-телекоммуникационные системы) и Перечню критических технологий РФ (п. 12. Технологии доступа к широкополосным мультимедийным услугам), утвержденным Указом Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899. Следует отдельно упомянуть, что в последнее время возникла необходимость в импортозамещении, т.е. создании отечественных технологий во всех сферах, в том числе, возросла актуальность разработки собственных алгоритмов и устройств беспроводной связи.

Актуальность темы обоснована тем, что в настоящий момент локальные системы беспроводной связи (wireless local area network, WLAN) широко применяются как в быту, так и на удалённых или опасных производственных объектах. Тенденцией последних лет во всем мире является необходимость обеспечить множеству людей возможность работать и получать услуги удаленно, что делает задачу развития способов доступа к сети Интернет и обмена информацией, в том числе развития локальных систем беспроводной связи, еще более актуальной.

Основная сложность при проектировании WLAN состоит в том, что эти системы используются в условиях города, зданий или отдельных помещений, то есть там, где условия распространения радиоволн существенно отличается от свободного пространства, ввиду таких эффектов, как полное или частичное отражение, прохождение сквозь препятствия, наличие или отсутствие линии прямой видимости, явление дифракции, диффузное рассеяние, интерференция.

Поскольку проектирование беспроводной системы связи представляет собой достаточно сложную задачу ввиду необходимости учета влияния множества факторов, то для уменьшения временных и материальных затрат целесообразно на этапе частотно-территориального планирования выполнить предварительное моделирование зоны покрытия сети с помощью программного обеспечения.

К системам, представляющим интерес для данного исследования можно отнести такие стандарты беспроводной связи, как Wi-Fi (IEEE 802.11), Wi-Max (IEEE 802.16), системы MIMO, а также системы 5G ввиду сходных механизмов взаимодействия электромагнитных волн со средой распространения.

Степень разработанности темы диссертации

Разработке моделей и методов анализа распространения радиоволн в условиях плотной городской застройки посвящены работы Okumura Y., Hata M., Xia H., Lee W., Berg J., Милютин Е.Р. и др. Различные способы лучевой трассировки рассматриваются в работах Yun Z., Iskander M.F., Zhang Z., Zhou C., Mohtashami V., Taygur M.M., Sukharevsky I.O., Eibert T.F., Wolfle G., Landstorfer E.M. Хотя задача анализа зоны покрытия беспроводной локальной сети актуальна, строгие методы анализа распространения радиоволн в помещении в настоящее время отсутствуют. Существуют программы для

тестирования уже действующих локальных сетей (Acrylic Wi Fi Home, AirScout Live, Homedale, Lizard Systems WiFi Scanner, Wireless Net View и т.д.). Однако представляет интерес программное обеспечение для предварительного моделирования беспроводной сети в урбанизированной среде до ее физического построения. Среди программ для расчета электромагнитного поля в зданиях на основании статистических и детерминированных моделей выделяются такие, как FEKO Altair (включая WinProp), Wireless Insite и TamoGraph Site Survey. Несмотря на наличие зарубежных коммерческих программ, в настоящее время возрастает актуальность разработки отечественного программного обеспечения для эффективного решения возникающих задач.¹ Данная работа посвящена разработке методики анализа распространения радиоволн в городской среде и внутри помещений для частотно-территориального планирования зоны покрытия локальных систем беспроводной связи. Предлагаемая методика основывается на явлениях геометрической оптики, которые рассматривали Борн М., Вольф Э., Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И., Петров Б.М., и геометрической теории дифракции, которую описывают Боровиков В.А., Кинбер Б.Е., Фок В.А., Кинг Р., Тай-Цзунь У. Проводимое исследование является продолжением и развитием подхода к анализу распространения электромагнитного поля в урбанизированной среде, предложенного научным консультантом по тематике данного исследования Паныхевым А.И.

Объект исследования: локальная система беспроводной связи.

Предмет исследования: распространение электромагнитной волны в зоне покрытия локальной системы беспроводной связи.

Цель диссертации: разработка гибридной имитационной модели распространения радиоволн в урбанизированной среде для частотно-территориального планирования зоны покрытия систем беспроводной связи.

Задачи исследования:

- разработка алгоритма анализа распространения радиоволн в городской среде и внутри помещений, сочетающего в себе статистические и детерминированные подходы;
- разработка программы для компьютерного моделирования распределения электромагнитного поля в заданных условиях с учетом эффектов многолучевого распространения, а также расположения и направленных и поляризационных свойств приемных и передающих антенн;
- разработка реконфигурируемой по частоте и поляризации антенны как элемента гибридной имитационной модели;
- оценка границ применимости гибридной имитационной модели для расчета распространения радиоволн в урбанизированной среде;

¹ Ваганова, А. А. Система автоматизированного проектирования радиочастотного планирования зон покрытия беспроводных систем связи в среде Mathcad / А. А. Ваганова, А. И. Паныхев, Н. Н. Кисель // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиопизики ВГУ (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.): в 5 томах. Т. 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – С. 277-284.

Тематика работы соответствует п. 10 «Исследования распространения радиоволн на различных трассах в природных и искусственных средах и влияние условий распространения и вида подстилающей поверхности на характеристики антенн» и п. 2 «Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.» областей исследований научной специальности 2.2.14 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Методы исследования: метод геометрической оптики, метод геометрической теории дифракции, методы статистического анализа данных.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается путём сравнительного анализа результатов численных расчётов и компьютерного моделирования, полученных с использованием специализированного программного обеспечения Altair FEKO, WinProp, сравнительного анализа результатов решения модельных задач с результатами, представленными в отечественных и зарубежных публикациях других авторов, экспериментальной верификацией результатов моделирования антенны.

Научная новизна данного исследования состоит в следующем:

- разработана гибридная имитационная модель распространения радиоволн в урбанизированной среде на основе статистических и детерминированных подходов для источников излучения с произвольными поляризационными и направленными свойствами;
- разработан новый алгоритм упрощенного учета дифракционных лучей при расчете распределения электрического поля.

Практическая ценность данного исследования состоит в следующем:

- разработана гибридная имитационная модель для частотно-территориального планирования зоны покрытия систем беспроводной связи;
- разработанная модель позволяет прогнозировать влияние движущихся препятствий на качество связи в беспроводном канале.

Личный вклад автора: основные научные результаты, результаты обзорных исследований, алгоритм и созданная на его основе компьютерная программа, математические модели и численные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором лично.

Реализация и внедрение результатов работы: результаты работы использованы при выполнении хоздоговорной работы № ХД-19-25-РТ (проект по созданию высокотехнологичного производства аппаратно-программных комплексов обработки сельхозсырья на основе СВЧ-излучения) в Инжиниринговом центре приборостроения радио и микроэлектроники НКБ «МИУС» ЮФУ, а также используются в учебном процессе кафедры антенн и радиопередающих устройств ИРТСУ ЮФУ. Акты внедрения приведены в приложениях к диссертации.

Апробация работы: результаты представлены и обсуждены на конференциях различного уровня, в том числе: международная научная конференция «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)» - 2017, 2019, 2021, 2023, Краснодарский край, п. Дивноморское; международный Московский семинар по электронным и сетевым технологиям “Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)” - 2020, 2018, г. Москва; международный симпозиум East-West Design & Test Symposium (EWDTS) -2018, г. Казань; международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь (RLNC)», 2023, г. Воронеж; международная научная конференция «Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)», 2016, г. Москва; международная научная конференция «Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo)» - 2015, 2016, Крым, г. Севастополь; всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех)», 2017, 2021, 2025, г. Таганрог.

Публикации по теме работы: по теме диссертационной работы опубликованы 24 работы, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, и 10 статей, проиндексированных в Scopus, и монография. Получено свидетельство о регистрации программы на ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Гибридная имитационная модель, реализованная в виде программы в среде Mathcad, позволяет выполнить анализ распространения электромагнитного поля в условиях помещений и городской застройки с учетом эффектов многолучевого распространения (соответствует п. 10 паспорта специальности 2.2.14) и комплексных характеристик направленности антенн и снизить оргпнизпционно-технические затраты при частотно-территориальном планировании зоны покрытия городской локальной системы связи;

2. Алгоритм упрощенного расчета коэффициентов дифракции радиоволн на ребрах препятствия (соответствует п. 10 паспорта специальности 2.2.14), представляющий собой комбинацию аналитических и вычислительных приемов, позволяет сократить время расчета примерно в 80 раз по сравнению с точным расчетом на том же компьютере при практически идентичных результатах (разность значений поля, полученных в одной и той же точке разными способами, не превышает 0,5 %);

3. Алгоритм статистической оценки изменения условий распространения электромагнитных волн (соответствует п. 10 паспорта специальности 2.2.14) позволяет учесть влияние случайного перемещения препятствий в зоне покрытия системы беспроводной связи, а также влияние неравномерностей отражающих поверхностей;

4. Конструкция реконфигурируемой перестраиваемой по частоте и поляризации микрополосковой антенны для устройств беспроводной связи диапазона 2 – 7 ГГц (соответствует п. 2 паспорта специальности 2.2.14) позволяет повысить эффективность приема сигнала в условиях многолучевого распространения (соответствует п. 10 паспорта специальности 2.2.14) за счет

выбора варианта настройки параметров антенны.

Структура и объем работы: Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста и заключения. Работа содержит 246 стр., в том числе 186 стр. основного текста, 100 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 249 наименований на 30 стр., приложения на 28 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель исследования и решаемые задачи. Выявлена научная новизна работы и отмечена практическая ценность результатов исследования.

В первой главе – «Анализ способов расчета зоны покрытия беспроводных локальных сетей и обоснование цели исследования» – рассматриваются методы анализа распространения электромагнитного поля в условиях помещений и городской застройки. Статистические методы используют выборку экспериментальных измерений сигналов в похожих условиях. Их достоинством является простота использования и скорость вычислений, а недостатком – приблизительность. Детерминистские методы позволяют выполнить расчет с учетом условий распространения сигнала, в том числе, особенностей застройки местности, однако необходим компромисс между точностью результатов и объемом вычислительных ресурсов. К этой группе относятся методы лучевой трассировки и численные методы.

Основными методами лучевой трассировки являются метод SBR (Shooting-and-Bouncing-Ray, метод запуска и отскока луча) и метод изображений (Image Method, метод зеркального источника). Метод SBR состоит в отслеживании каждого луча с целью определить, достигнет ли он точки приема. Метод изображений заключается в построении изображений приемника (или источника) по отношению ко всем отражающим поверхностям и определении траекторий лучей по направлению к этим изображениям. Метод SBR проще в реализации, но метод изображений более точен. Существуют гибридные подходы, сочетающие в себе несколько методов, например, SBR и метод изображений, либо SBR и статистический подход. Численные методы наиболее точны, но из-за высоких требований к вычислительным ресурсам их использование для электрически больших задач нецелесообразно.

Существуют программы для тестирования локальных сетей, позволяющие измерять уровень сигнала в конкретных точках. Они могут использоваться для проектирования новых сетей, но выезд специалиста на место развертывания сети и установка оборудования увеличивают временные и финансовые затраты. Поэтому представляет интерес программное обеспечение, позволяющее выполнить компьютерное моделирование сети в помещении без тестовых измерений. Среди программ для расчета электромагнитного поля в зданиях можно выделить такие, как FEKO Altair (включая WinProp), Wireless Insite и TamoGraph Site Survey. Возможность лучевой трассировки и анализа зоны покрытия появилась в Matlab, начиная с версии 2019. Несмотря на наличие зарубежных коммерческих программ, в настоящее время возросла

актуальность разработки отечественного программного обеспечения.²

Наиболее адекватной моделью распространения радиоволн в урбанизированной среде является гибридная модель, учитывающая детерминированные характеристики места функционирования конкретной системы связи и одновременно позволяющая учесть возможность случайного изменения условий распространения с помощью введения в модель статистической компоненты.³ Для уменьшения временных и материальных затрат при проектировании беспроводной системы связи целесообразно на этапе частотно-территориального планирования выполнить предварительное моделирование зоны покрытия с помощью программного обеспечения. Данное исследование посвящено разработке гибридной имитационной модели распространения радиоволн в урбанизированной среде, которая может стать основой для создания отечественного программного обеспечения, предназначенного для частотно-территориального планирования зоны покрытия систем беспроводной связи.

Во второй главе – «Разработка гибридной имитационной модели распространения радиоволн в урбанизированной среде» – предложена гибридная имитационная модель распространения радиоволн в урбанизированной среде, основанная на принципах геометрической оптики и геометрической теории дифракции и объединяющая детерминированный расчет распределения электромагнитного поля в конкретных условиях и статистический учет их возможного изменения.

Во-первых, предложен алгоритм расчета распространения электромагнитного поля (рисунок 1), состоящий из четырех уровней.

На первом уровне определяется взаимное положение передатчика, приемника и препятствия. Второй уровень алгоритма для лучей различных видов формирует область пространства, занятую тенью от расположенных в помещении предметов. На третьем уровне выполняется трассировка лучей различных механизмов распространения, проникающих из рассматриваемого помещения в смежные или наоборот. Четвертый уровень представляет собой расчет напряженности электрического поля.

Использование методов геометрической оптики правомерно, если вблизи луча на расстоянии много большем размера первой зоны Френеля отсутствуют резкие изменения свойств среды распространения, в связи с чем при разработке моделей использованы следующие допущения:²

а) отражающие поверхности полагаются гладкими и находятся в радиусе первой зоны Френеля. Отражение и прохождение описывается с помощью коэффициентов отражения и прохождения Френеля;

² Ваганова, А. А. Система автоматизированного проектирования радиочастотного планирования зон покрытия беспроводных систем связи в среде Mathcad / А. А. Ваганова, А. И. Паньчев, Н. Н. Кисель // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиопрофики ВГУ (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.) : в 5 томах. Т. 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – С. 277-284.

³ Паньчев, А. И. Приближенный учет дифракции радиоволн в задачах расчета зоны покрытия беспроводной сети / А. И. Паньчев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5(190). – С. 135-148. – DOI 10.23683/2311-3103-2017-5-135-148. (K2).

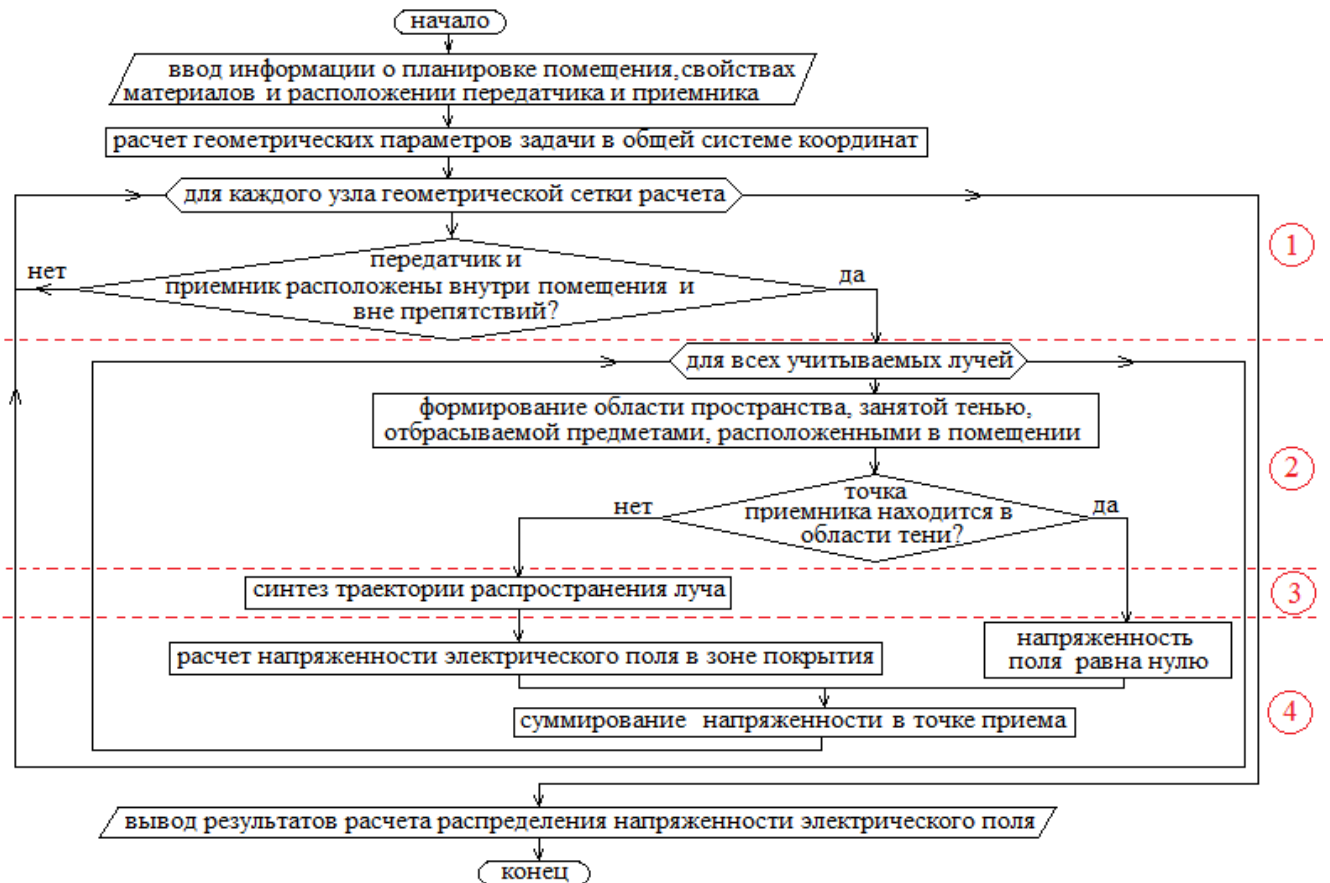


Рисунок 1 — Обобщенная схема алгоритма анализа распространения электромагнитного поля

б) величина неровностей отражающих поверхностей h мала по сравнению с длиной волны. Поскольку $h < \lambda / (16 \cdot \sin \theta_0)$, то для волны с частотой 2,4 ГГц, падающей под углом $\theta_0 = 90^\circ$, поверхности можно считать гладкими, если $h < 0,78$ см;

в) падающее поле полагается локально плоским. Расстояние r от источника электромагнитного поля до отражающей поверхности должно быть не меньше трех длин волн. Для частоты 2,4 ГГц $r \geq 3\lambda = 3 \cdot 12,5 = 37,5$ см.

Во-вторых, выполнен синтез траектории многократно преломленной электромагнитной волны и продемонстрировано применение алгоритма для учета проникновения сигнала из смежных помещений. Для расчета уровня поля используется комплексный коэффициент передачи многолучевого канала:⁴

$$h = \sqrt{D^t D^r} F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r) L_0 L^{pol} L^t L^r V,$$

где индекс «0» относится к прямому лучу; индексы «t» и «r» относятся к параметрам передатчика и приемника; λ^t — длина волны передатчика; D^t и D^r — максимальные значения коэффициентов направленного действия;

$F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t)$ и $F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r)$ — характеристики направленности антенн; $L_0 = \frac{\lambda^t e^{-jkR_0}}{4\pi R_0}$ —

⁴ Panychev, A. I. Estimation of the transmission coefficients of a MIMO system radio channel indoors / A. I. Panychev, A. A. Vaganova, N. N. Kisel // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018, Moscow, 14-16 March 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – DOI 10.1109/MWENT.2018.8337297.

ослабление сигнала на радиолнии длиной R_0 ; k - коэффициент распространения радиоволн; L^{pol} - поляризационный коэффициент передачи; L' и L'' - затухание радиосигнала в передающем и приемном элементах из-за омических потерь и из-за рассогласования антенн с линиями передачи; V - множитель влияния среды, учитывающий эффекты многолучевого распространения (отражение от внутренних поверхностей, прохождение сквозь стены и перекрытия и дифракцию на конструктивных элементах зданий):

$$V = 1 + \sum V^{refr} + \sum V^{pass} + \sum V^{diffr}.$$

В-третьих, предложен алгоритм упрощенного расчета коэффициентов дифракции на ребрах препятствия. Электромагнитное поле падает на клин под углом θ_0 к одной из граней, после чего дифракционное поле распространяется под углом θ к той же грани. Коэффициенты дифракции для параллельной поляризации определяются следующим образом:⁵

$$D_{||} = \frac{-e^{j\frac{\pi}{4}}}{2n\sqrt{2\pi k}} \left[\cot\left(\frac{\pi + (\theta - \theta_0)}{2n}\right) F(kla_1(\theta - \theta_0)) + \cot\left(\frac{\pi - (\theta - \theta_0)}{2n}\right) F(kla_2(\theta - \theta_0)) + \right. \\ \left. + R_{||n}(n\pi - \theta) \cot\left(\frac{\pi + (\theta + \theta_0)}{2n}\right) F(kla_1(\theta + \theta_0)) + \right. \\ \left. + R_{||0}(\theta_0) \cot\left(\frac{\pi - (\theta + \theta_0)}{2n}\right) F(kla_2(\theta + \theta_0)) \right],$$

где $R_{||0}$ и $R_{||n}$ - коэффициенты отражения. Для перпендикулярной поляризации используются соответствующие коэффициенты отражения $R_{\perp 0}$ и $R_{\perp n}$.

Функция $F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-jt^2} dt$ выражается через интеграл Френеля.

При расчете коэффициентов дифракции возникает проблема вычисления интегралов от быстро осциллирующей функции в бесконечных пределах. Воспользовавшись асимптотикой для интеграла Френеля при значениях аргумента, характерных для геометрических размеров помещения,⁵ предлагается определить значение интеграла $F(x)$ как

$$F(x) = \begin{cases} 2\sqrt{x}e^{jx} \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{4} (j+1) - [jC(\sqrt{x}) + S(\sqrt{x})] \right), & 0 \leq x \leq 10, \\ 1, & x > 10. \end{cases}$$

Упрощение в вычислительной части состоит в отсечении области, где коэффициенты дифракции имеют величину первого и меньшего порядка малости.⁵ На рисунке 2 показана зависимость коэффициентов дифракции от угла наблюдения θ при углах падения $\theta_0 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ и параллельной поляризации, для перпендикулярной поляризации зависимости аналогичны.

⁵ Паньчев, А. И. Приближенный учет дифракции радиоволн в задачах расчета зоны покрытия беспроводной сети / А. И. Паньчев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2017. - № 5(190). - С. 135-148. - DOI 10.23683/2311-3103-2017-5-135-148. (K2).

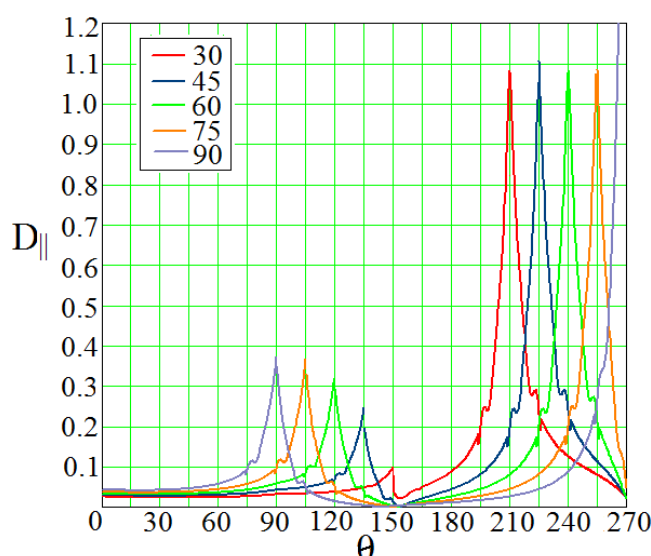


Рисунок 2 — Зависимость коэффициентов дифракции от угла наблюдения

Коэффициенты дифракции имеют резко обозначенные максимумы в направлениях $\theta = 180 \pm \theta_0$ и небольшую величину в остальном секторе углов. Это позволяет ограничиться при расчете диапазоном $\pm 15^\circ$ от направления максимума, поскольку только здесь дифракционные лучи вносят заметный вклад в общую интенсивность электромагнитного поля. В остальном диапазоне углов коэффициент дифракции не превышает 0,2 что позволяет пренебречь им.

Рисунок 3 демонстрирует результаты расчета напряженности электрического поля, полученные двумя способами.⁶ Напряженность электрического поля источника равна 1 В/м. На рисунке 4 представлено распределение поля по координатам x и y , то есть вдоль и поперек помещения.

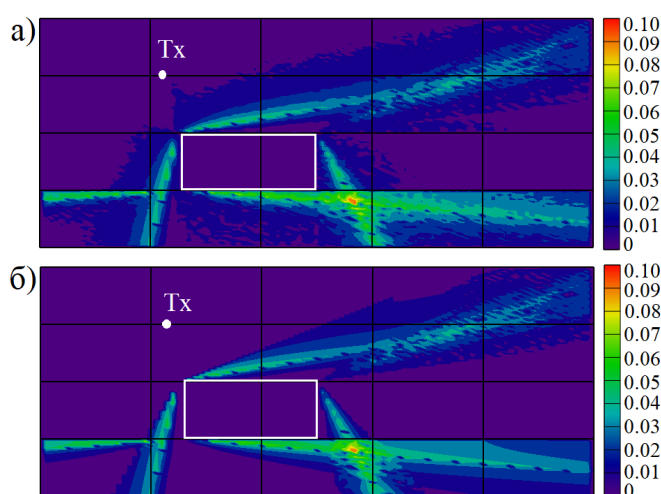


Рисунок 3 — Сравнение результатов расчета напряженности поля (В/м):
а) по формуле без упрощения;
б) с упрощением

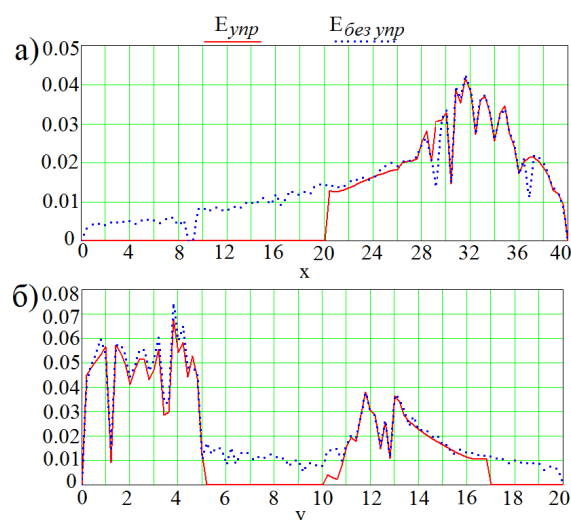


Рисунок 4 — Распределение напряженности поля (В/м) по координате

а) x ($x = 0 \dots 40$ м; $y = 15$ м; $z = 5$ м);
б) y ($x = 24$ м; $y = 0 \dots 20$ м; $z = 5$ м)

Синяя линия соответствует расчету без упрощений, а красная — упрощенному. Отличие заметно лишь в областях с нулевым уровнем напряженности. В остальных областях разность значений, полученных в одной точке разными способами, не превышает 3,6 мВ/м, при этом использование предложенных упрощений уменьшило время расчета на том же компьютере

⁶ Панычев, А. И. Приближенный учет дифракции радиоволн в задачах расчета зоны покрытия беспроводной сети / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2017. — № 5(190). — С. 135-148. — DOI 10.23683/2311-3103-2017-5-135-148. (K2).

примерно в 80 раз. Следовательно, предложенный алгоритм целесообразен по совокупности точности результата и требуемых вычислительных ресурсов.

В-четвертых, предложен алгоритм, позволяющий предварительно оценить зоны затенения для лучей различных видов, создаваемые находящимися в помещении препятствиями, и исключить их из дальнейшего рассмотрения. На рисунке 5 изображена модель помещения с передатчиком Tx (рисунок 5, а) и результат расчета затенения с учетом прямых, отраженных и дифракционных лучей (рисунок 5, б). Исключение областей тени из расчета при анализе зоны покрытия способствует упрощению расчета и уменьшению вычислительных ресурсов.⁷ В рассматриваемом примере при исключении из расчета недостижимой для прямого луча области уровень поля, создаваемого прямым лучом, будет вычислен на 25% быстрее.

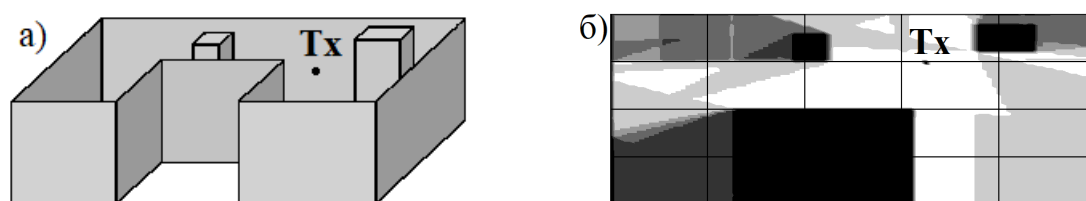


Рисунок 5 — Области тени в помещении

В-пятых, предложен алгоритм статистической оценки изменения условий распространения в зоне покрытия, возникающего вследствие случайного перемещения групп людей, транспортных средств, движущихся частей механизмов и т. д., заключающийся в том, что между передающей и приемной частями системы помещается препятствие, положение которого описывается статистическим законом распределения.

В третьей главе – «Моделирование зоны покрытия систем беспроводной связи на основе предложенного алгоритма» – продемонстрированы результаты решения демонстрационных модельных задач в среде Mathcad с использованием разработанного алгоритма и выполнено сравнение с коммерческим программным обеспечением WinProp.

Во-первых, показана возможность применения алгоритма для оценки влияния случайного изменения условий распространения на величину элементов канальной матрицы системы из нескольких передатчиков и приемников.⁸ В зоне действия системы перемещается препятствие, имитирующее влияние подвижных объектов. Рассчитаны значения напряженности электрического поля в точках расположения каждого из приемников при 100 случайных положениях препятствия и выполнена статистическая обработка результатов, позволяющая определить наиболее вероятное значение напряженности поля, принятого по каждому из каналов. При величине излучаемого каждым передатчиком поля равной 1 В/м, полученные значения фактически равны коэффициентам передачи каналов.

⁷ Панычев, А. И. Анализ многолучевой структуры электромагнитного поля в помещении с группой препятствий / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3(176). – С. 53-65. (K2).

⁸ Ваганова, А. А. Детерминированно-статистический подход к оценке канальной матрицы системы ММО / А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель, А. И. Панычев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 3(197). – С. 124-135. – DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-124-135. (K2).

В-вторых, промоделировано распределение электрического поля передатчика Tx с частотой 2,4 ГГц в горизонтальном сечении помещения (рисунок 6) на высоте 1,5 м. Отражающие поверхности выполнены из бетона с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4,4 - 0,18j$.

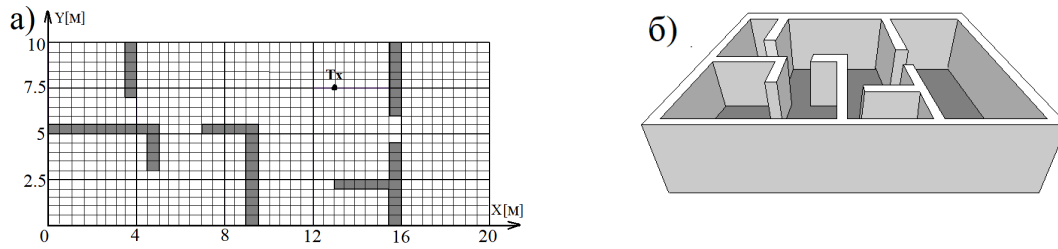


Рисунок 6 — Модель помещения: а) в горизонтальной плоскости; б) трехмерная

Результат расчета в Mathcad по предложенному алгоритму показан на рисунке 7, а. На рисунках 7, б – г приведены результаты расчета в WinProp. На рисунках 7, б – г выделенные голубым стены в реальности отсутствуют (имеют параметры воздуха), поэтому модели помещения в Mathcad и WinProp эквивалентны. Рисунок 7, б соответствует лучевой трассировке (3D Ray Tracing, SRT) с учетом одного отражения, одного прохождения и одной дифракции. Используются коэффициенты Френеля и метод геометрической теории дифракции, что максимально приближает модель WinProp к используемой в предложенном алгоритме. Рисунок 7, в учитывает максимально возможное в WinProp количество эффектов многолучевого распространения (3 прохождения, 3 отражения и 2 дифракции). Увеличение времени расчета по сравнению с предлагаемым алгоритмом при незначительном изменении результата говорит о том, что учитываемых эффектов в предыдущих случаях было достаточно. Рисунок 7, г демонстрирует расчет по модели Multi-Wall Model (COST 231). Во всех случаях результаты практически одинаковы. Различие в цифрах объясняется тем, что в Mathcad выполнена нормировка на максимум. Разница между максимальным и минимальным значениями практически совпадает.⁹

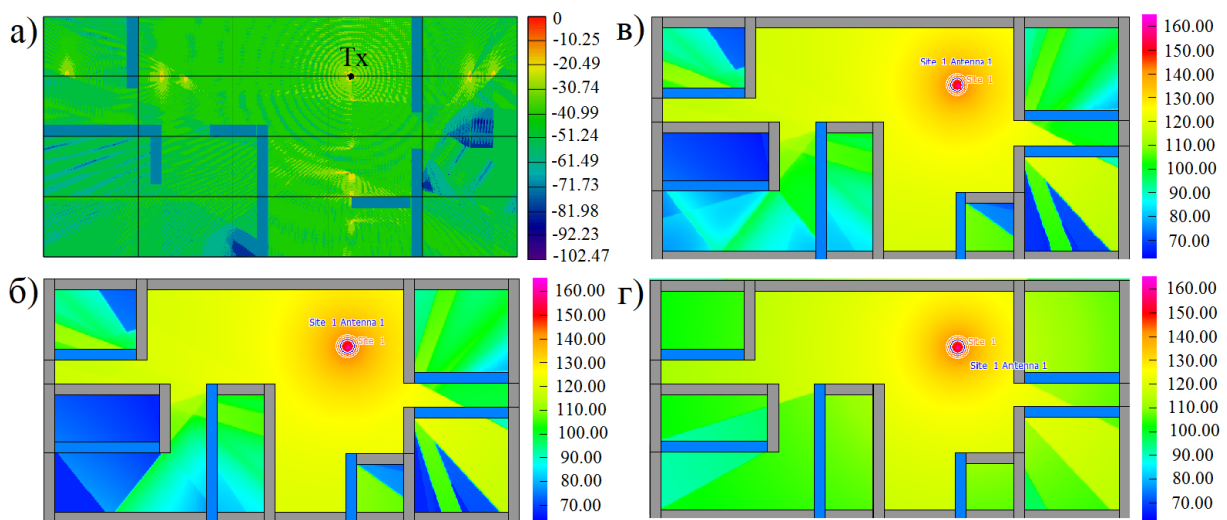


Рисунок 7 — Напряженность электрического поля (дБ) в помещении

⁹ Vaganova, A. A. Developing an automated design system for radio frequency planning of wireless communication coverage in Mathcad environment / A. A. Vaganova, A. I. Panychev, N.N. Kisel // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, 26-30 June 2023. – IEEE, 2023. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202132.

Рассчитанная по предложенному алгоритму карта покрытия (рисунок 8), показывает, что в этом помещении лучше использовать несколько передатчиков, так как остается много пространства с чрезмерно низким уровнем поля. Однако цифры, характеризующие качество связи, зависят от конкретной задачи и от субъективной оценки пользователя.

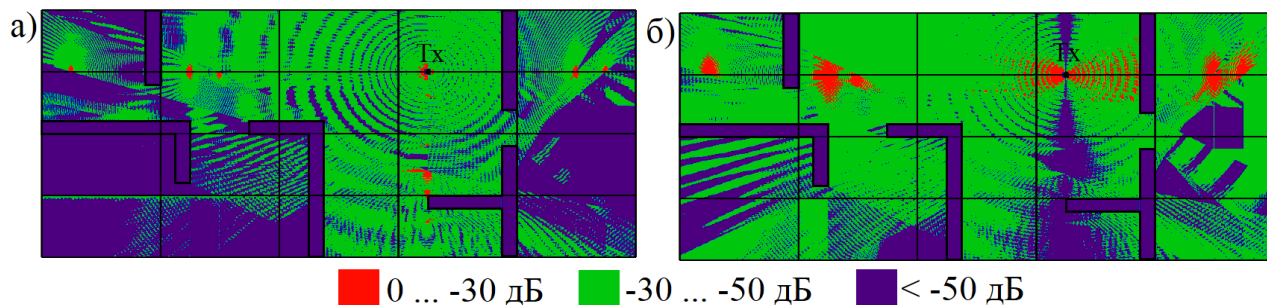


Рисунок 8 — Карта покрытия: а) всенаправленная антенна; б) вибратор, параллельный Oх

В-третьих, промоделировано распространение волн с частотой 4,7 ГГц в городском районе (рисунок 9). Учтено отражение от стен, крыш, земли и вертикальных плоскостей $y = 0$ м и $y = 200$ м (имитируют влияние зданий, расположенных рядом с исследуемой областью). Отражение от неба и от плоскостей $x = 0$ м и $x = 400$ м не учитывается, поскольку предполагается, что в этих направлениях препятствия отсутствуют.

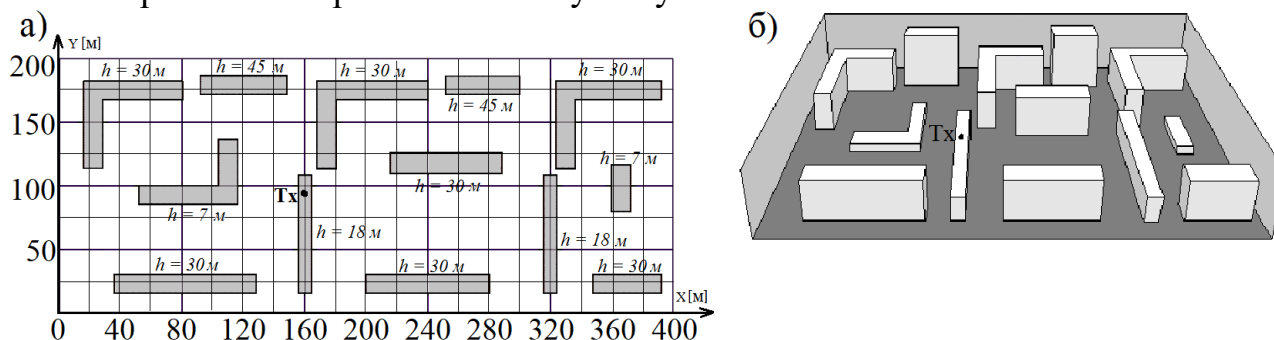


Рисунок 9 – Модель городского района:
а) в горизонтальной плоскости; б) трехмерная

Распределение электрического поля на разной высоте h рассчитано в Mathcad по предложенному алгоритму (рисунок 10, а) и в WinProp (рисунок 10, б). Различие в цифрах объясняется тем, что в предложенной программе выполняется нормировка на максимум, однако, динамический диапазон результатов практически совпадает.¹⁰ Достаточно точное совпадение результатов решения аналогичных задач с помощью разработанной программы и зарубежного коммерческого ПО WinProp свидетельствует о том, что предложенный алгоритм является корректным.

Карта покрытия (рисунок 11), рассчитанная в Mathcad по предложенному алгоритму, позволяет выбрать вариант расположения антенны, обеспечивающий

¹⁰ Vaganova, A. A. Developing an automated design system for radio frequency planning of wireless communication coverage in Mathcad environment / A. A. Vaganova, A. I. Panychev, N.N. Kisel // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, 26-30 June 2023. – IEEE, 2023. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202132.

большую область с хорошим качеством связи.¹¹

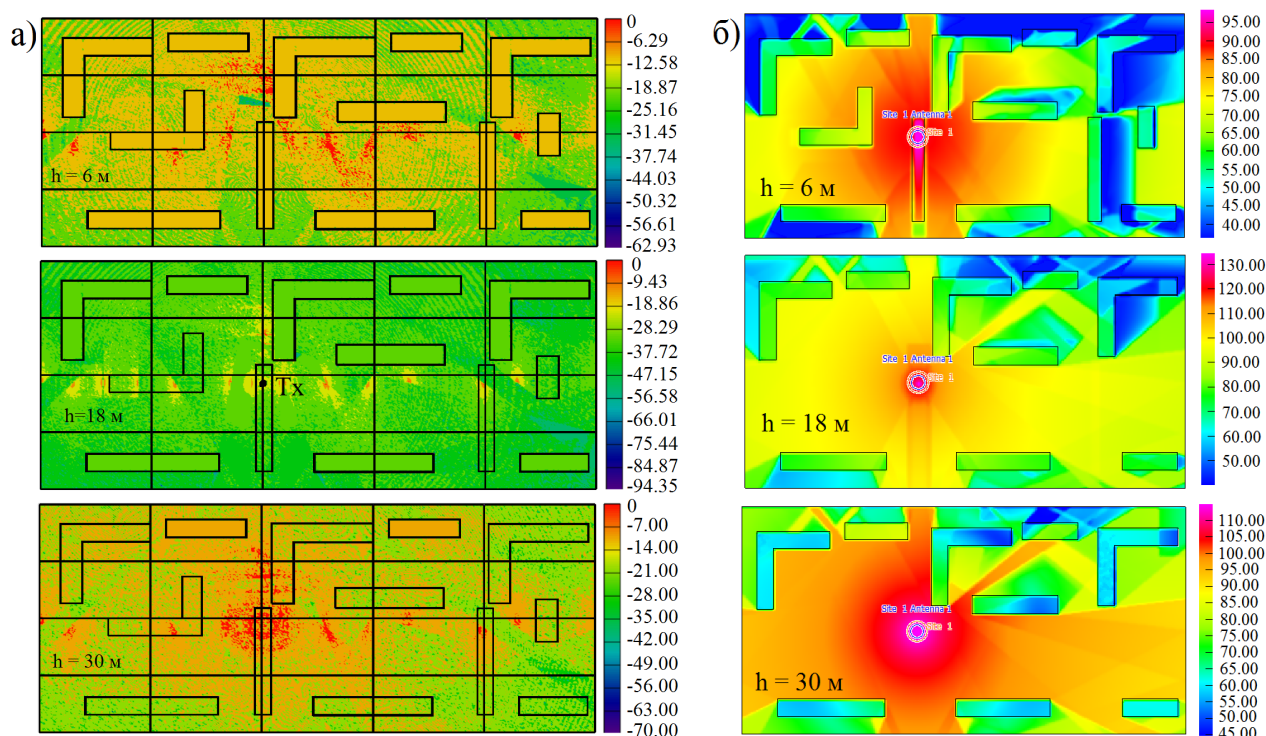


Рисунок 10 — Распределение напряженности электрического поля в городском районе на различных высотах:

а) расчет по разработанному алгоритму; б) расчет в WinProp

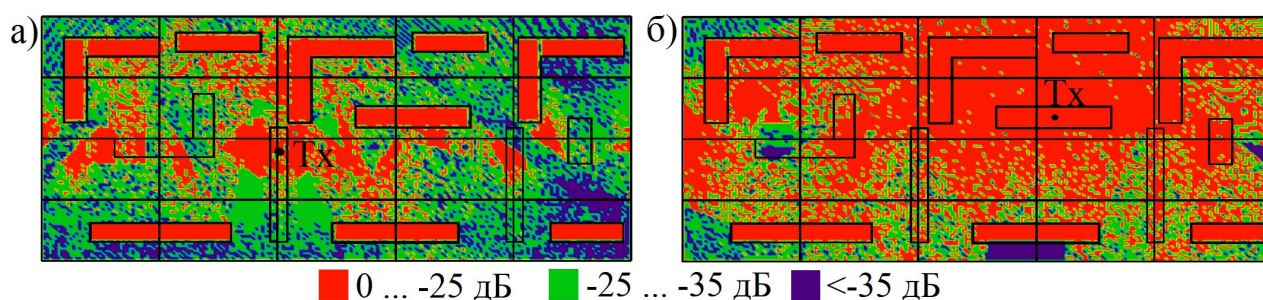


Рисунок 11 — Карта покрытия (дБ) в городском районе для двух положений передающей антенны: а) Tx (161; 93; 18) б) Tx(250; 120; 30)

В четвертой главе – «Учет направленных свойств антенны в гибридной имитационной модели распространения радиоволн» – предложена конструкция антенны (рисунок 12). Антенна расположена на подложке из диэлектрика FR4 с проницаемостью $\epsilon = 4,7$ и тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = 0,018$. Сигнал из общего порта с двух сторон поступает к излучающей части (рисунок 12, а). В ветви для передачи сигнала встроены pin-диоды D1 и D2, в зависимости от режима работы которых может нарушаться симметрия конструкции, за счет чего может изменяться поляризация. Конструкция заземляющей плоскости (рисунок 12, б) изменяется переключением pin-диодов D3, D4 и D5, скачкообразно меняя резонансную

¹¹ Ваганова, А. А. Импортзамещающая программа моделирования многолучевого распространения радиоволн для учебных целей / А. А. Ваганова, А. И. Панычев, Н. Н. Кисель // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании : материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Таганрог, 20-21 мая 2024 г. : в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. – С. 222-227.

частоту антенны в диапазоне 2 – 7 ГГц.¹² Далее pin-диоды в открытом состоянии обозначаются как «1», а в закрытом – «0».

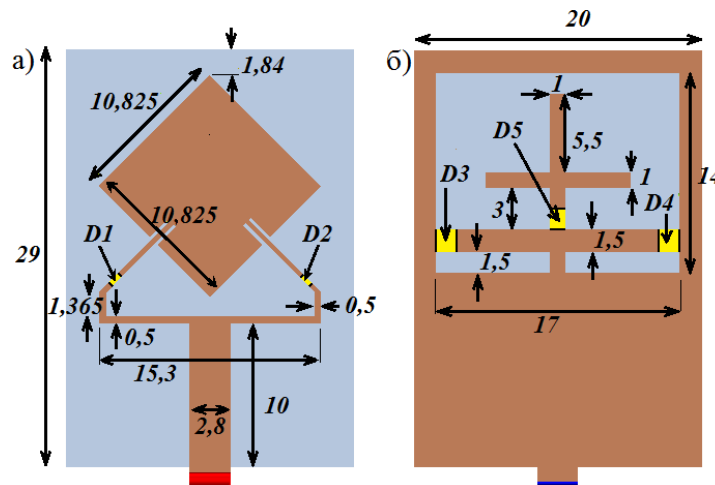


Рисунок 12 – Конструкция антенны

На рисунке 13 показаны объемные диаграммы направленности антенн, а на рисунке 14 — диаграммы направленности для компонент поля с основной и ортогональной поляризацией для двух вариантов настройки антенны.

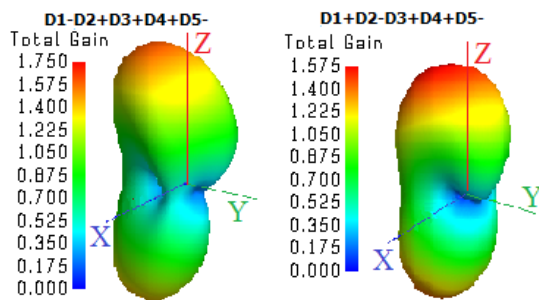


Рисунок 13 – Диаграммы направленности антенны в режимах 01110 и 10110

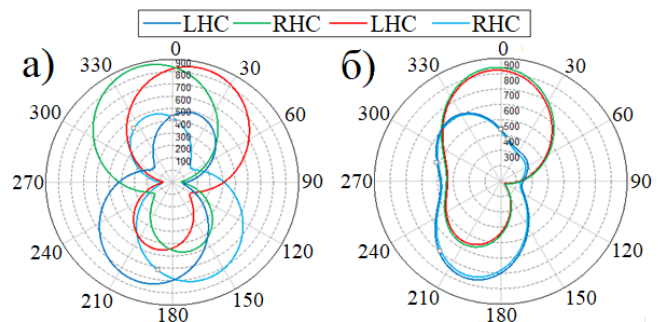


Рисунок 14 – Диаграммы направленности (мВ) в режимах 01110 (красная и синяя линии) и 10110 (зеленая и голубая линии): а) $\varphi = 0^\circ$; б) $\varphi = 90^\circ$

Компоненты поля правого вращения в режиме 01110 равны компонентам поля левого вращения в режиме 10110 и наоборот, то есть для каждой пары режимов, отличающихся только состоянием D1 и D2, поляризация меняется с правой на левую на одной частоте.¹² Полученные при моделировании в САПР FEKO параметры антенны для разных режимов приведены в таблице 1.

Для проверки работоспособности антенны изготовлен макет из материала с $\varepsilon = 3,7$ и тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta = 0,009$, изображенный на рисунке 15.

Таким образом проверено два случая – открыты диоды D1, D3 и D4 (10110) и открыты диоды D1, D2, D3 и D4 (11110). Измерения выполнены с помощью анализатора цепей Agilent E8361A. На рисунке 16 приведены частотные зависимости КСВ макета.

¹² Ваганова, А. А. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации / А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель, А. И. Панычев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2(219). – С. 74-83. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-74-83. (K2).

Таблица 1

Параметры антенны в различных режимах работы

Режим	Резонансная частота	S11	KCB	Поляризация
11110	3,7 ГГц	-26 дБ	1,1	Линейная
	6,25 ГГц	-13 дБ	1,6	Эллиптическая
11111	2,05 ГГц	-15 дБ	1,5	Линейная
11000	5,2 ГГц	-27 дБ	1,1	Эллиптическая
	6,65 ГГц	-9 дБ	2,2	Эллиптическая
01110	5,4 ГГц	-16 дБ	1,5	Левая круговая
10110		-15 дБ		Правая круговая
01000	2,45 ГГц	-9 дБ	2	Линейная
10000				
01000	5,75 ГГц	-27 дБ	1,2	Левая круговая
10000				Правая круговая
01111	5,6 ГГц	-9 дБ	2,2	Левая круговая
10111				Правая круговая

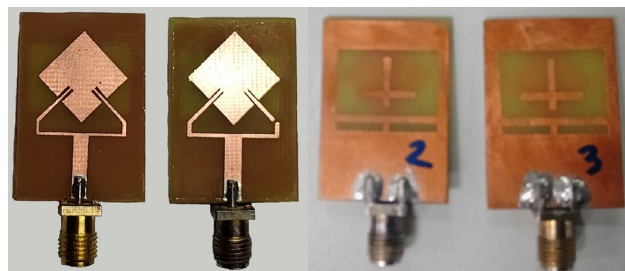


Рисунок 15 – Макет антенны

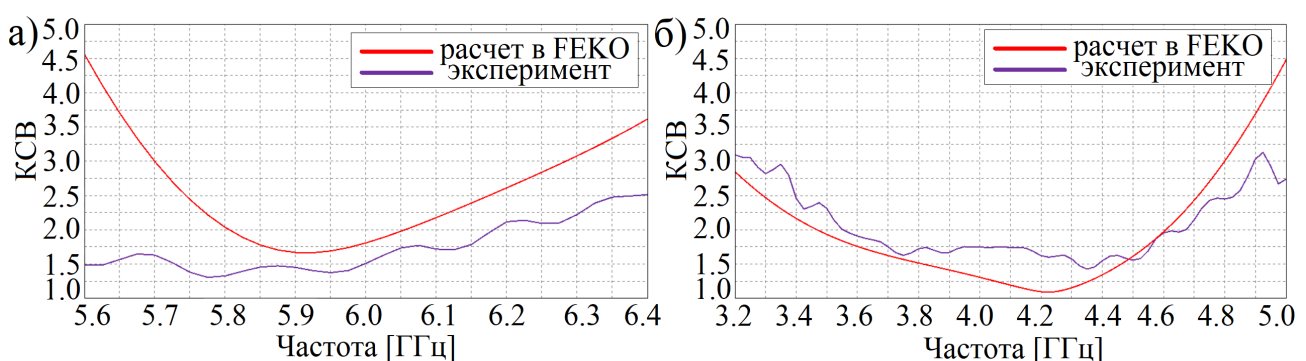


Рисунок 16 – Зависимость KCB от частоты в режиме 10110 (а) и 11110 (б)

Сходство результатов моделирования в FEKO и экспериментального измерения параметров антенны (таблица 2) подтверждает правильность моделирования и возможность использования разработанной антенны в диапазоне 2 - 7 ГГц. Различия вызваны недостаточной точностью изготовления макета.

Таблица 2

Параметры антенны в различных режимах работы

Режим		Резонансная частота	S11	КСВ	Полоса КСВ < 2
10110	FEKO	5,9 ГГц	-12 дБ	1,7	0,25 ГГц
	Эксперим.	5,9 ГГц	-15 дБ	1,4	0,77 ГГц
11110	FEKO	4,22 ГГц	-27,5 дБ	1,1	1,15 ГГц
	Эксперим.	4,22 ГГц	-12,5 дБ	1,6	1,1 ГГц

Предлагаемый алгоритм позволяет учесть направленность антенны, (можно описать математическим выражением, либо использовать результаты, полученные в специализированной программе).¹³ На рисунке 17 показаны диаграммы направленности антенны (*Total Gain*) в различных режимах работы, восстановленные по данным расчета в FEKO и соответствующее распределение электрического поля в городском районе. Выбор частоты и диаграммы направленности позволяет для каждого случая подобрать вариант, обеспечивающий наилучшее покрытие.¹⁴

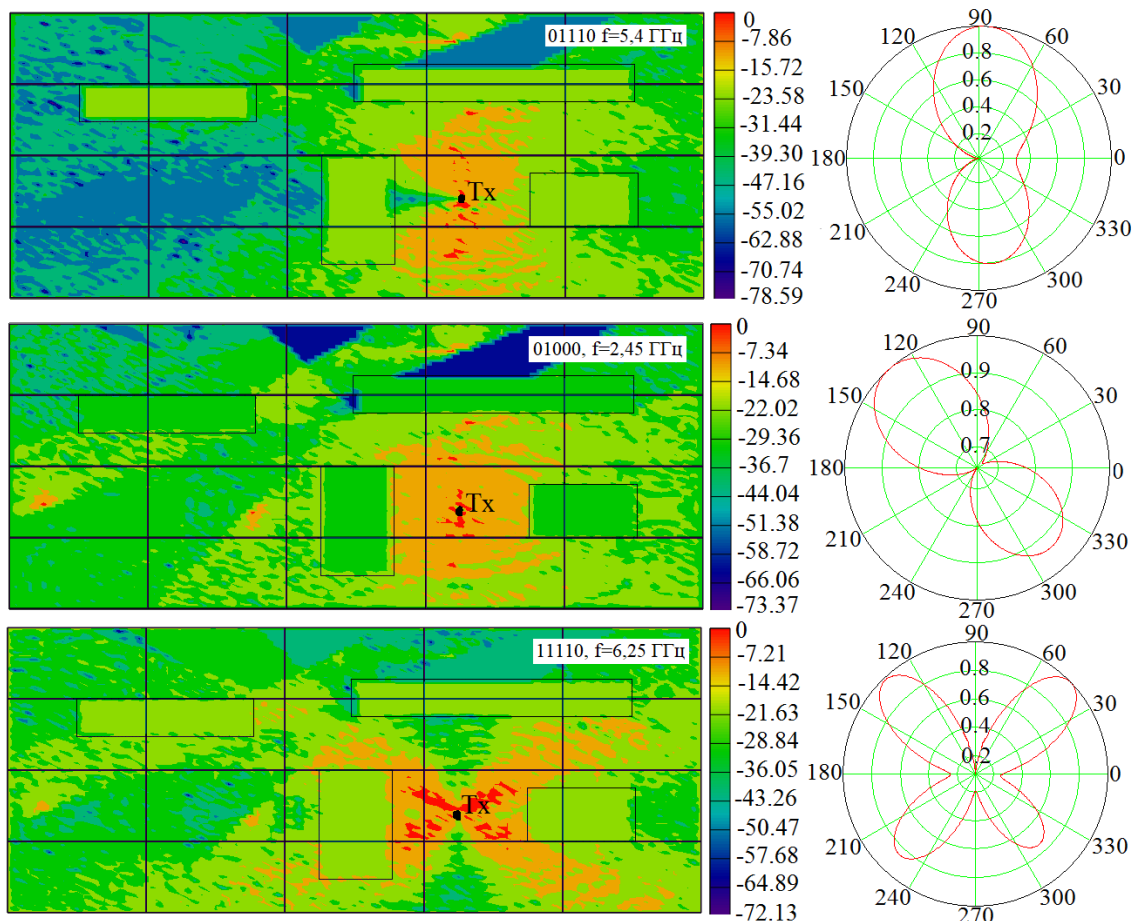


Рисунок 17 – Распределение напряженности электрического поля (дБ)

¹³ Ваганова, А. А. Импортзамещающая программа моделирования многолучевого распространения радиоволн для учебных целей / А. А. Ваганова, А. И. Панычев, Н. Н. Кисель // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании : материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Таганрог, 20-21 мая 2024 г. : в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. – С. 222-227.

¹⁴ Ваганова, А. А. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации / А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель, А. И. Панычев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2(219). – С. 74-83. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-74-83. (К2).

В заключении обобщены основные полученные в диссертационной работе научные результаты теоретического и прикладного характера, сформулированы выводы.

В приложениях к диссертации приведены текст программы расчета распределения поля, акты о внедрении результатов исследования и свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основным научным результатом в соответствии с заявленной целью работы является гибридная имитационная модель, позволяющая выполнить компьютерное моделирование распространения радиоволн в урбанизированной среде и на основании полученных результатов подобрать расположение приемопередающих элементов, обеспечивающее требуемое покрытие, что способствует уменьшению затрат при частотно-территориальном планировании зоны покрытия локальной системы беспроводной связи. Сравнение результатов решения аналогичных задач с помощью предложенной программы и зарубежного коммерческого ПО WinProp свидетельствует о том, что предложенная модель является корректной и может в дальнейшем стать основой для создания полноценного отечественного программного обеспечения. **Таким образом, цель диссертационного исследования достигнута полностью.** В соответствии с поставленными задачами получены следующие результаты.

1. Разработана гибридная имитационная модель распространения радиоволн в урбанизированной среде, основанная на принципах геометрической оптики и геометрической теории дифракции и позволяющая рассчитать распределение электромагнитного поля в зоне покрытия локальной системы беспроводной связи с учетом эффектов многолучевого распространения в характерном для таких систем частотном диапазоне (единицы и десятки ГГц). Анализируемая область пространства имеет размеры от нескольких метров до нескольких сотен метров. Методика объединяет в себе детерминированный расчет распределения поля в конкретных условиях и статистический учет возможного случайного изменения этих условий.

2. Разработан алгоритм и программа в среде Mathcad для компьютерного моделирования распространения электромагнитного поля в условиях многолучевого распространения, основанный на принципах геометрической оптики и геометрической теории дифракции. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663221 Российская Федерация. Программа трехмерной лучевой трассировки и расчета интенсивности электромагнитного поля в помещении с препятствием / А.А. Ваганова, А.И. Панычев; правообладатель ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24 октября 2018 года.

3. Алгоритм обладает такими отличительными особенностями, как:

- выполняется предварительная оценка областей затенения, создаваемых расположенными в зоне покрытия сети препятствиями, с целью исключения

этих областей из рассмотрения при последующем расчете уровня сигнала в помещении. За счет этого достигается упрощение и ускорение расчета, тем большее, чем большую часть исследуемого пространства занимает область тени (в рассмотренном примере – на 25% быстрее);

- используется разработанный автором алгоритм упрощенного расчета коэффициентов дифракции радиоволн на ребрах препятствия для двумерного случая, представляющий собой комбинацию аналитических и вычислительных приемов и позволяющий сократить время расчета примерно в 80 раз по сравнению с точным расчетом на том же компьютере при практически идентичных результатах (при заданной величине напряженности источника 1 В/м разность значений поля, полученных в одной и той же точке разными способами, не превышает 0,5%);

- используется разработанный автором алгоритм статистической оценки изменения условий распространения электромагнитных волн, позволяющий учесть влияние случайного перемещения препятствий в зоне покрытия системы беспроводной связи, а также влияние неравномерностей отражающих поверхностей, описав положение препятствия и/или неравномерности некоторым статистическим законом распределения, что может быть полезным при планировании беспроводных систем связи в местах с высокой вероятностью изменения условий распространения;

- алгоритм позволяет учесть характеристики направленности и поляризационные свойства передающей и приемной антенн, как описав диаграмму направленности известной математической формулой в MathCad, так и воспользовавшись результатами расчета диаграммы направленности в специализированной программе (FEKO, HFSS и т.д.).

4. Для повышения эффективности связи в условиях многолучевого распространения разработана конструкция реконфигурируемой микрополосковой антенны для устройств беспроводной связи, способной перестраиваться по частоте и поляризации. Выбор варианта настройки антенны, наилучшим образом подходящего для конкретного места развертывания сети беспроводной связи может быть выполнен как экспериментально, так и на основании предварительной оценки зоны покрытия с использованием предложенной модели.

5. Разработанный алгоритм может применяться не только для анализа зоны покрытия городских локальных систем связи, но и в других областях, связанных с анализом многолучевого распространения волн. Выполнено моделирование распределения электрического поля системы WLAN в помещении и показана возможность применения предложенной методики для оценки канальной матрицы системы из нескольких элементов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК:

1. Панычев, А. И. Анализ многолучевой структуры электромагнитного поля в помещении с группой препятствий / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3(176). – С. 53-65. (К2).

2. Панычев, А. И. Приближенный учет дифракции радиоволн в задачах расчета зоны покрытия беспроводной сети / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 5(190). – С. 135-148. – DOI 10.23683/2311-3103-2017-5-135-148. (K2).

3. Ваганова, А. А. Детерминированно-статистический подход к оценке канальной матрицы системы ММО / А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель, А. И. Панычев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 3(197). – С. 124-135. – DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-124-135. (K2).

4. Ваганова, А. А. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации / А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель, А. И. Панычев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 2(219). – С. 74-83. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-74-83. (K2).

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ:

5. Панычев, А. И. Учет неровности поверхностей при анализе многолучевого распространения радиоволн в помещениях / А. И. Панычев, А. В. Максимов, А. А. Ваганова // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/4/text.pdf> (дата обращения 25.06.2026). (K1).

Публикации в сборниках трудов конференций:

6. Панычев, А. И. Трехмерная трассировка сигналов локальной беспроводной сети связи между помещениями / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015) : 25-я Международная Крымская конференция, 6-12 сентября 2015 г. Севастополь, Крым, Россия : материалы конференции : в 2 томах. Т. 1. – Moscow [etc.] : КНТЦ им. Попова, 2015. – С. 211-212.

7. Панычев, А. И. Синтез траектории лучевого преломления сигналов локальной беспроводной сети связи на элементах конструкций здания / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Международная научная конференция "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" : ИРЭМВ-2015 : труды конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Совет по комплексной проблеме "Распространение радиоволн" РАН [и др.]. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. – С. 400-403.

8. Панычев, А. И. Оценка объемного распределения интенсивности проникающих в помещение сигналов WLAN / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 26-я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2016), 4-10 сентября 2016 г., Севастополь, Крым, Россия : [в 13 т.]. Т. 3 : Системы СВЧ связи, вещания и навигации. – Москва [и др.] : КНТЦ им. Попова, 2016. – С. 437-443.

9. Ваганова, А. А. Оценка интенсивности радиоизлучения источника, расположенного за преградой / А. А. Ваганова, А. И. Панычев // Проблемы современной системотехники : сборник научных статей. Вып. 10 / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Институт радиотехнических систем и управления ;

редакционная коллегия: Потипак М. В., Сущенко М. И., Лобач В. Т., Корниенко В. Т. (отв. редактор). – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 41-46. – EDN XILLJH.

10. Панычев, А. И. Упрощенный расчет коэффициентов дифракции радиоволн внутри помещения / А. И. Панычев, А. А. Ваганова // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении "КомТех-2017" : материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – С. 119-124.

11. Ваганова, А. А. Система автоматизированного проектирования радиочастотного планирования зон покрытия беспроводных систем связи в среде Mathcad / А. А. Ваганова, А. И. Панычев, Н. Н. Кисель // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиопизики ВГУ (г. Воронеж, 18-20 апреля 2023 г.) : в 5 томах. Т. 4 / Министерство науки и высшего образования РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный университет", Физический факультет, АО "Концерн "Созвездие"". – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2023. – С. 277-284.

12. Ваганова, А. А. Импортзамещающая программа моделирования многолучевого распространения радиоволн для учебных целей / А. А. Ваганова, А. И. Панычев, Н. Н. Кисель // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании : материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Таганрог, 20-21 мая 2024 г. : в двух томах. Т. 1. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2024. – С. 222-227.

13. Panychev, A. I. Modeling of ray refraction of WLAN signals on the structural elements of the building / A. I. Panychev, A. A. Vaganova // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016, Moscow, 12 - 14 May 2016 : Proceedings. – IEEE, 2016. – DOI 10.1109/SIBCON.2016.7491718.

14. Panychev, A.I. Approximate calculation of the diffraction coefficients in the analysis of WLAN coverage area / A.I. Panychev, A.A. Vaganova // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2017), Gelendjik – Divnomorskoe, 26-30 June 2017. – IEEE, 2017. – P. 238-241. – DOI 10.1109/RSEMW.2017.8103638.

15. Panychev, A. I. Statistical evaluation of the influence of irregularities of reflecting surfaces at the planning of WLAN indoors / A. I. Panychev, A. A. Vaganova // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017, Kazakhstan, Astana, 29 - 30 June 2017 : Proceedings. – IEEE, 2017. – DOI 10.1109/SIBCON.2017.7998455.

16. Panychev, A. I. Efficient three-dimensional ray tracing and electromagnetic field intensity estimation algorithm for WLAN / A. I. Panychev, A. A. Vaganova // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2017, Serbia, Novi Sad, 29 September - 02 October 2017. – IEEE, 2017. – DOI

10.1109/EWDTS.2017.8110105.

17. Panychev, A. I. Estimation of the transmission coefficients of a MIMO system radio channel indoors / A. I. Panychev, A. A. Vaganova, N. N. Kisel // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018, Moscow, 14-16 March 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – DOI 10.1109/MWENT.2018.8337297.

18. Vaganova, A. A. The deterministic-statistical model of a MIMO system signal propagation indoors / A. A. Vaganova, A. I. Panychev, N. N. Kisel // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2018, Kazan, 14-17 September 2018. – IEEE, 2018. – P. 378-383. – DOI 10.1109/EWDTS.2018.8524603.

19. Vaganova, A. A. Simulation model of 5G coverage in urban areas / A. A. Vaganova, N. N. Kisel, A. I. Panychev // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 24-28 June 2019 : Conference Proceedings. – IEEE, 2019. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792791.

20. Vaganova, A. A. Statistical account of the obstacle position in a MIMO system channel matrix indoors / A. A. Vaganova, N. N. Kisel, A. I. Panychev // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020, Moscow, 11-13 March 2020 : Proceedings. – IEEE, 2020. – DOI 10.1109/MWENT47943.2020.9067462.

21. Vaganova, A. A. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization / A. A. Vaganova, N. N. Kisel, A. I. Panychev // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 28 June – 02 July 2021. – IEEE, 2021. – P. 127-130. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494120.

22. Vaganova, A. A. Developing an automated design system for radio frequency planning of wireless communication coverage in Mathcad environment / A. A. Vaganova, A. I. Panychev, N.N. Kisel // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, 26-30 June 2023. – IEEE, 2023. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202132.

Монография

23. Панычев, А. И. Распространение радиоволн в локальных системах связи : монография / А. И. Панычев, А. А. Ваганова, Н. Н. Кисель ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Инженерно-технологическая академия. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2025. – 182, [1] с. – DOI 10.18522/801332835. – ISBN 978-5-9275-4879-8 : 50 экз.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663221 Российская Федерация. Программа трехмерной лучевой трассировки и расчета интенсивности электромагнитного поля в помещении с препятствием : № 2018660212 : заявл. 24.09.2018 : опубл. 24.10.2018 / А. А. Ваганова, А. И. Панычев ; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (Южный федеральный университет).

Ваганова Анастасия Алексеевна
ГИБРИДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН
В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 08.10.2026 г.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист.1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 33

Отпечатано в отделе полиграфии центра услуг «Караван», 615400225064
347922, г.Таганрог, пер. Некрасовский, 63, тел 8-928-600-8000