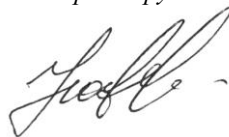


На правах рукописи



Нарышкин Михаил Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
ОСНОВ СОЗДАНИЯ МАЛОКАНАЛЬНЫХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ
КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ RoF**

Специальности:

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций;

05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технологии исследований и инноваций специальной связи» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГБОУ ВО ПГУТИ).

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор Букашкин Сергей Анатольевич.

Официальные оппоненты:

Виноградова Ирина Леонидовна, доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа. Профессор кафедры телекоммуникационных систем.

Седельников Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань. Профессор кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем.

Ведущая организация:

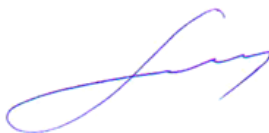
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Защита диссертации состоится 30.06.2017 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ПГУТИ и на сайте www.psuti.ru.

Автореферат разослан «__»_____2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 219.003.02, д.т.н., профессор



А.И. Тяжев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время, наряду с развитием и совершенствованием сетей подвижной радиосвязи и радиодоступа общего пользования, существенное место в составе сетей и систем телекоммуникаций занимают корпоративные технологические сети подвижной радиосвязи, а также близкие к ним по ряду характеристик сети специальной подвижной радиосвязи.

В числе причин возрастания роли таких сетей следует назвать продолжающийся процесс внедрения технологий автоматизированного оперативного управления сложными комплексами и процессами, что в свою очередь предполагает наличие надежной устойчивой связи (телеграфной, телефонной, телекодовой, факсимильной, аудиовизуальной и др.) между объектами и субъектами управления, независимо от местонахождения последних. При этом конфигурация зоны обслуживания сети должна включать все без исключения возможные места постоянного и временного пребывания абонентов либо должна обеспечиваться возможность оперативного создания на некоторое определенное время дополнительных зон обслуживания в необходимых местах.

Поскольку объекты управления очень часто связаны с использованием информации, составляющей государственную тайну, либо относятся к критически важным или потенциально опасным, то одной из важнейших задач при создании и обеспечении функционирования подобных сетей является надежная крипто- и имитозащита информации.

С учетом нарастающих террористических угроз и постоянного совершенствования тактики и технических средств съема и навязывания информации, применяемых возможными противниками, требования к живучести сетей, а также крипто- и имитозащите информации, включая сигналы (команды) управления оборудованием сети, существенно возрастают. Действующие сети уже не вполне отвечают новым, а тем более прогнозируемым перспективным требованиям.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная **научно-техническая проблема** создания нового поколения корпоративных сетей подвижной радиосвязи, обеспечивающих высокое качество радиопокрытия и защиты передаваемой конфиденциальной информации.

Степень разработанности темы исследования

Корпоративные и ведомственные сети профессиональной подвижной радиосвязи строятся по транкинговому принципу либо с закрепленными каналами. При этом используются два основных варианта структуры – радиальная и радиально-зонавая.

Важной особенностью корпоративных сетей являются высокие требования к информационной безопасности, связанные с характером передаваемой информации и объектов управления. Требования к перспективным сетям предполагают дальнейшее повышение качества и надежности обеспе-

чения информационной безопасности, что может реализовываться, например, на основе двухконтурной схемы крипто- и имитозащиты информационных сигналов и команд управления оборудованием базовых станций (БС).

Ключевым моментом в проектировании корпоративных сетей является выбор технологии. В литературе описана перспективная на сегодняшний день технология «Радио поверх волокна» (Radio-over-Fiber, RoF), реализующая передачу радиочастотного сигнала по волоконно-эфирной структуре. Основоположником применения данной технологии в сетях связи является А.А. Соорер. Кроме того, значительный вклад в развитие технологии RoF внесли В.Х. Багманов, М.Е. Белкин, И.Л. Виноградова, А.Х. Султанов, R. Karthikeyan, N. Kumari, T. Monro, S. Prakasam и другие. Основные приложения, применительно к которым до настоящего времени разрабатывалась эта технология, включают сотовые сети, беспроводные локальные сети передачи данных, системы передачи видеосигнала и беспроводные сети связи между транспортными средствами. Таким образом, решения для корпоративных технологических сетей подвижной радиосвязи с учетом их специфики еще ждут своей разработки.

Проведенный анализ известных решений по построению антенн БС показал наличие достаточной номенклатуры всенаправленных и направленных антенн различных диапазонов, в том числе – используемых корпоративными сетями подвижной радиосвязи. В тех случаях, когда возникают существенные ограничения по габаритным размерам, внешнему виду (требование сохранения облика объекта установки), необходимость формирования двух- и многополосных частотных характеристик и т.д., весьма перспективным представляется использование антенн со сложной структурой излучающей системы, в том числе – фрактальных, примеры которых приведены в работах А.А. Потапова и других. Инструментарий расчета и проектирования антенн и их систем представлен разнообразными строгими и приближенными методами электродинамического моделирования и реализующими их программными комплексами.

В целом проведенный анализ степени разработанности темы исследования показал перспективность создания корпоративных сетей подвижной радиосвязи нового поколения, обеспечивающих улучшенные тактико-технические характеристики и эффективную защиту информации, на основе передовых технологий. В то же время, установлено отсутствие готовых решений и методов в указанной области и необходимость разработки научно-технических основ создания таких сетей, разработки или адаптации методов проектирования сетей, их составных частей и оборудования, включая антенно-фидерное.

Цель диссертационной работы – разработка научно-технических основ, методик проектирования и технических решений, а также проведение теоретических и экспериментальных исследований в целях создания мало-канальных разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи на базе технологии «Радио поверх волокна» (Radio-over-Fiber – RoF).

Задачи диссертационной работы:

- анализ особенностей малоканальных корпоративных сетей подвижной радиосвязи и методов проектирования сетей и зон обслуживания базовых станций, технических решений антенн базовых станций, методов и программных средств их проектирования;
- обоснование применения технологии RoF, архитектуры, состава и принципов частотно-территориального планирования сети;
- разработка математической модели и проведение моделирования дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну;
- анализ вариантов подавления связи между оптическими передатчиками при дуплексной связи по одному оптическому волокну;
- экспериментальные исследования дуплексной передачи сигналов системы RoF по одному оптическому волокну;
- разработка математической модели и методики проектирования многодиапазонных антенн базовых станций на основе фрактальных структур; исследование и разработка антенно-фидерных систем на основе фрактальных структур;
- экспериментальные исследования макета фрагмента сети RoF и антенно-фидерных устройств базовых станций.

Объект исследований – корпоративные сети подвижной радиосвязи.

Предмет исследований – научные основы и методы проектирования распределенных малоканальных корпоративных сетей подвижной радиосвязи на основе технологии RoF, их составных частей и оборудования, включая антенны базовых станций.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны научно-технические основы создания малоканальных разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи, включая разработку основных требований к ним, обоснование выбора технологии RoF, обоснование архитектуры, состава сети и требований к составу оборудования центральных и базовых станций для различных вариантов, обоснование принципов частотно-территориального планирования.

2. Разработана модифицированная математическая модель дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну, проведен анализ вариантов подавления связи между оптическими передатчиками, получены новые расчетные и экспериментальные результаты оценки параметров сигнала при дуплексной передаче сигналов RoF по одному оптическому волокну, включая глаз-диаграммы и зависимости коэффициента ошибок от длины линии.

3. На основе известных методов электродинамического анализа разработана математическая модель и методика проектирования многодиапазонных антенн базовых станций в виде сложных проволочных и плоскостных фрактальных структур, включающая применение тонкопроволочных и плоскостных моделей и алгоритмы автоматизированного построения геометрии структуры.

4. Получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований макета фрагмента сети RoF, включая зависимости времени прохождения и потерь кадров и отношения сигнал/шум от мощности передатчика, а также новые результаты исследований пространственных и импедансных характеристик многодиапазонных антенн базовых станций, построенных на основе фрактальных структур.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные автором научно-технические основы создания малоканальных разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи на основе технологии RoF, математическая модель дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну и соответствующие результаты расчетов, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований макета фрагмента сети RoF позволяют с новых позиций определить эффективные пути развития и совершенствования корпоративных и специальных сетей подвижной радиосвязи, расширяют номенклатуру методов исследования, моделирования и проектирования таких сетей, а также знания об их достижимых характеристиках.

2. Разработанная математическая модель и методика проектирования многодиапазонных антенн базовых станций в виде сложных проволочных и плоскостных фрактальных структур, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований таких антенн расширяют знания о достижимых характеристиках и потенциальных возможностях подобных антенн и могут быть использованы при решении практических задач создания антенных систем различного назначения и диапазонов.

3. О практической значимости работы дополнительно свидетельствуют результаты использования отдельных положений, выводов и решений на предприятиях России согласно полученным актам внедрения.

Соответствие рассматриваемым специальностям

Диссертационная работа **соответствует** п. 3, 11, 14 паспорта специальности 05.12.13 и п. 1, 2 паспорта специальности 05.12.07.

Методы исследований

При выполнении диссертационной работы использовались методы математического моделирования, вычислительной электродинамики, физического эксперимента, теории антенн, численные методы. Для проведения расчетов использовался прошедший государственную регистрацию программный комплекс, разработанный в АО «Концерн «Автоматика».

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов и построенных на их основе расчетных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается результатами сопоставления расчетных и экспериментальных данных, а также результатами внедрения разработанных методик и технических решений.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной

новизной и выносимые на защиту, получены автором **лично**. В научных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат разработка математических моделей и методик, а также результаты исследования характеристик в рамках разработки новых технических решений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно-технические основы создания малоканальных разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи, включая разработку основных требований к ним, обоснование выбора технологии RoF, обоснование архитектуры, состава сети и требований к составу оборудования центральных и базовых станций для различных вариантов, обоснование принципов частотно-территориального планирования.

2. Модифицированная математическая модель дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну, результаты анализа вариантов подавления связи между оптическими передатчиками, новые расчетные и экспериментальные результаты исследований дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну.

3. Математическая модель и методика проектирования многодиапазонных антенн базовых станций на основе фрактальных структур сложной геометрии.

4. Новые результаты теоретических и экспериментальных исследований макета фрагмента сети RoF и антенн базовых станций, построенных на основе фрактальных структур сложной геометрии.

Апробация результатов работы и публикации

Основные результаты по теме диссертационного исследования **докладывались** на XXIII и XXIV Российских научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 2016, 2017), III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2016), XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Самара, 2016), XIV Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2016).

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) **опубликовано** 16 печатных трудов. Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных статьях в журналах, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», в 8 публикациях в форме тезисов докладов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы, при активном непосредственном участии автора, успешно внедрены на предприятиях России. Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 223 страницы, включая 121 рисунок и 10 таблиц. Список литературы содержит 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, указаны объект и предмет исследований, описаны состав и структура работы, показаны научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы, указано соответствие рассматриваемым специальностям, указаны используемые методы исследований, показаны обоснованность и достоверность результатов, указан личный вклад автора, приведены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов работы и публикациях, описана реализация результатов работы.

Раздел 1 посвящен разработке научно-технических основ создания малоканальных разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи.

Проведен анализ особенностей малоканальных корпоративных сетей подвижной радиосвязи. Уточнена их классификация. Обосновано определение малоканальной корпоративной сети подвижной радиосвязи (МКК СПРС) как корпоративной или ведомственной профессиональной (технологической или специального назначения) сети подвижной радиосвязи с закрепленными каналами. Установлены основные особенности МКК СПРС. Рассмотрены особенности радиальной и радиально-зоновой структуры сети. Показано, что дальнейшим развитием радиально-зонового принципа построения является распределенная сеть с относительно большим числом маломощных БС. Обоснована необходимость решений, обеспечивающих информационную безопасность, при которых в состав БС включается только приемопередающее и антенно-фидерное оборудование. Обоснована необходимость создания решений антенн, которые могут быть размещены на зданиях без нарушения архитектурного облика объекта установки. Рассмотрены основные варианты частотного планирования.

Выполнен анализ методов проектирования сетей и зон обслуживания базовых станций, обоснованы требования к их уточнению и адаптации. Показано, что задача расчета зон обслуживания БС и сети в целом в настоящее время решается на основе моделей и методов, установленных соответствующими национальными стандартами и рекомендациями МСЭ-Р, с использованием цифровых моделей местности. Рассмотрен алгоритм построения зон обслуживания и частные алгоритмы построения зоны радиопокрытия БС и расчета ослабления радиосигнала на трассе. Показано, что методы проектирования распределенных малоканальных корпоративных сетей, по-

видимому, могут опираться на существующие подходы, однако нуждаются в существенной корректировке и доработке с учетом особенностей МКК СПРС, включая технологический характер сети, малоканальность, закрепленные за абонентами каналы, необходимость максимальной «привязки» БС к имеющейся инфраструктуре, особенно к транспортным сетям.

Рассмотрены вопросы обоснования применения технологии RoF, архитектуры, состава и принципов частотно-территориального планирования сети. Показана перспективность использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в том числе – выделенных оптических волокон (ОВ) в их составе. Обоснована перспективность варианта реализации распределенных МКК СПРС на основе использования технологии RoF, реализующей передачу радиочастотного сигнала по волоконно-эфирной структуре. Отмечены известные преимущества систем RoF по сравнению с традиционными технологиями радиосвязи. Проанализированы основные варианты построения систем RoF, отмечены основные достоинства и недостатки каждого варианта, выбран наиболее перспективный вариант – «радиочастота по волокну»: Radio Frequency-over-Fiber (RfFoF).

Выполнен анализ технических решений антенн базовых станций, методов и программных средств их проектирования. Рассмотрены основные решения всенаправленных и направленных антенн БС на основе излучателей различных типов. Обоснована перспективность фрактальных антенн и фрактальной геометрии антенных решеток, что позволяет создавать антенные системы с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками. Показано, что для электродинамического анализа антенн базовых станций с учетом их окружения целесообразно выбрать отечественный программный комплекс Scater, однако в рамках построения методики анализа и проектирования необходимой номенклатуры антенн необходимо дополнительно разработать и реализовать алгоритмы автоматизированного построения геометрии фрактальных структур.

Раздел 2 посвящен исследованию дуплексной передачи сигналов RoF подвижной радиосвязи по одному оптическому волокну.

Обосновано предпочтительное использование ступенчатых одномодовых оптических волокон диапазона C и полупроводникового лазера с распределенной обратной связью типа DFB (Distributed Feedback Laser) с учетом требований минимизации потерь.

Проанализированы основные причины возникновения обратного потока. Рассчитаны характеристики затухания отражения и оптического отношения сигнал/шум (С/Ш) как функции протяженности оптического тракта.

Обоснована модель некогерентного взаимодействия лазеров оптических передатчиков системы при дуплексной работе по одному оптическому волокну при отсутствии специальных средств подавления встречного потока. С учетом искажений сигналов в оптическом волокне для анализа интенсивности оптического излучения на входах/выходах оптического волокна получена модифицированная система дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1(t)}{\partial t} &= P_1(t) - I_1(t) - k_{11}I_1^2(t) - k_{21}\bar{I}_2(t - \tau)I_1(t), \\ \frac{\partial I_2(t)}{\partial t} &= P_2(t) - I_2(t) - k_{22}I_2^2(t) - k_{12}\bar{I}_1(t - \tau)I_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_{1,2}(t)$ – интенсивности излучения первого и второго лазеров; $\bar{I}_{1,2}(t - \tau)$ – интенсивности оптического излучения лазеров 1 и 2 с учетом искажений после прохождения по оптическому линейному тракту; $P_{1,2}(t)$ – параметр накачки лазеров 1 и 2; $k_{11}k_{12}, k_{21}k_{22}$ – коэффициенты связи; τ – задержка сигнала в оптическом волокне.

Получены результаты моделирования дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну. В качестве примера на рис. 1 представлены глаз-диаграмма для длины ОВ 1 км при подключении оптических передатчиков к одному оптическому волокну при отсутствии специальных мер по подавлению оптической связи между лазерами передатчиков центральной станции (ЦС) и БС. На рис. 2 показан график зависимости вероятности ошибки (BER) от длины линии также при отсутствии специальных мер по подавлению оптической связи между лазерами.

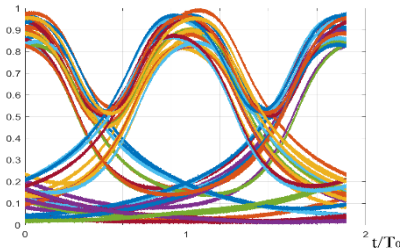


Рис. 1 – Глаз-диаграмма, рассчитанная для длины ОВ 1 км

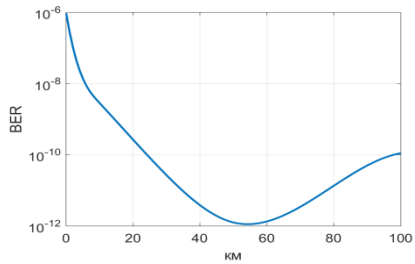


Рис. 2 – Зависимость вероятности ошибок от длины линии

Выполнен анализ вариантов подавления связи между оптическими передатчиками. Показано, что для наиболее экономичного варианта – подключение передатчика и приемника к одному оптическому волокну через оптические разветвители без дополнительных устройств подавления обратной связи – требуемое качество передачи и защиту передатчика можно обеспечить включением в тракт (при необходимости) дополнительных аттенуаторов.

Проведены экспериментальные исследования дуплексной передачи сигналов системы RoF по одному оптическому волокну при различных вариантах построения схемы. В качестве примера на рис. 3 приведена схема экспериментального макета передачи сигнала RoF с использованием одноволоконной схемы связи. Оценка параметров качества пакетного канала связи

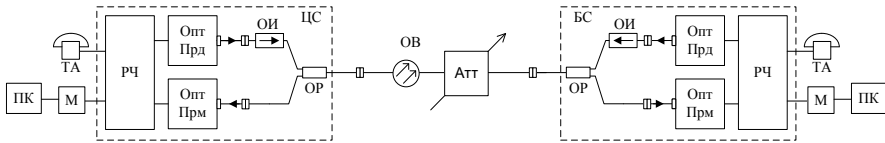


Рис. 3 – Схема экспериментального макета передачи сигнала RoF

осуществлялась посредством измерения уровня потерь пакетов и задержки распространения пакетов для разных размеров кадра. Измерение задержки проводилось для оценки времени, которое необходимо кадру для прохождения по сети от исходного элемента к конечному сетевому элементу. Для оценки параметров качества пакетной передачи данных устанавливалось компьютерное соединение посредством организации удаленного доступа. На рис. 4 представлены соответствующие АЧХ при различных конфигурациях оптического тракта. Результаты измерений хорошо согласуются с результатами расчетов.

В разделе 3 приведены результаты разработки и реализации методики проектирования многодиапазонных антенн базовых станций на основе фрактальных структур.

На основе решения внешних задач электродинамики, с использованием разработанных автором алгоритмов автоматизированного построения геометрии фрактальных структур, разработана методика проектирования многодиапазонных антенн базовых станций в виде сложных проволочных и плоскостных фрактальных структур. Алгоритмы построения геометрии позволяют рассчитывать геометрию конструкции фрактальных антенн на основе кривых Коха, Гильберта и диполя Серпинского любого порядка, а также диполей ФРМ (фрактальное разбиение медианами) любой итерации. В качестве примера на рис. 5 приведены фрактальные кривые Коха первого (а) и второго (б) порядков, координаты которых определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$C(x_3, y_3) = A(x_1, y_1) + \frac{1}{3}(B(x_2, y_2) - A(x_1, y_1)),$$

$$E(x_5, y_5) = A(x_1, y_1) + \frac{2}{3}(B(x_2, y_2) - A(x_1, y_1)),$$

$$D(x_4) = C(x_3) + (E(x_5) - C(x_3))\cos\frac{\pi}{3} - (E(y_5) - C(y_3))\sin\frac{\pi}{3},$$

$$D(y_4) = C(y_3) + (E(x_5) - C(x_3))\sin\frac{\pi}{3} + (E(y_5) - C(y_3))\cos\frac{\pi}{3}.$$

(2)

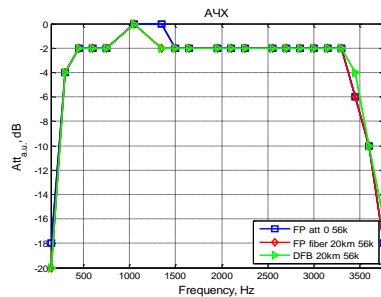


Рис. 4 – АЧХ при различных конфигурациях оптического тракта

Проведены исследование и разработка антенно-фидерных систем базовых станций, не искажающих архитектурный облик объекта установки, на основе фрактальных структур. Проанализированы импедансные и пространственные характеристики фрактальных антенн на основе кривых Коха и Гильберта. На рис. 6 приведены частотные зависимости входного импеданса фрактальной кривой Коха четвертого порядка. Приведенные графики свидетельствуют о многодиапазонности рассматриваемой антенны.

Анализ показал, что данные антенны, обладая свойством многодиапазонности, не уступают по характеристикам традиционным антенным решениям, а порой даже и превосходят их.

Выполнены исследование и разработка фрактальных антенн для передвижных базовых станций. Проанализированы различные ва-

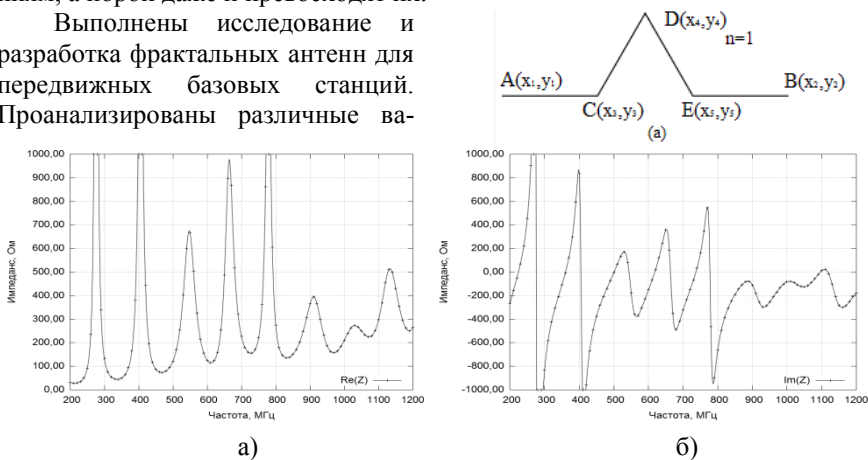


Рис. 6 – Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей входного импеданса от частоты

рианты антенных систем, предназначенных для использования в передвижных базовых станциях и абонентских устройствах. На рис. 7 приведены ДН диполя Серпинского на рабочих частотах при длине плеча $l = 0,14$ м.

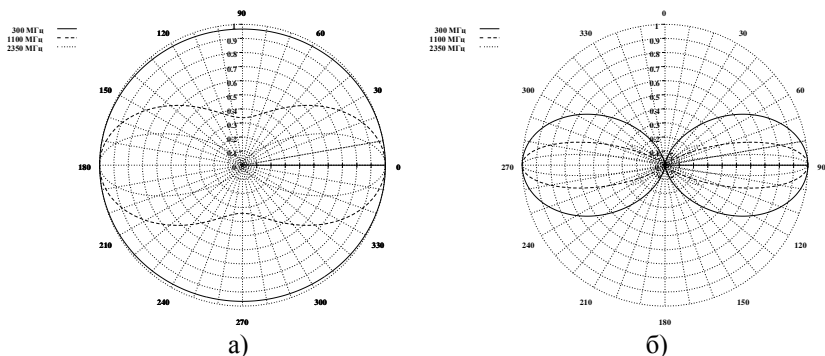


Рис. 7 – ДН антенны в азимутальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

Результаты исследований показали перспективность предлагаемых решений для создания многодиапазонных базовых станций. При этом предпочтительным является использование шунтовых антенн в силу их существенно большей широкополосности.

Раздел 4 посвящен экспериментальным исследованиям и практической реализации составных частей разветвленной сети подвижной радиосвязи.

Выполнены реализация и экспериментальные исследования антенно-фидерных устройств базовых станций. В соответствии с разработанной методикой спроектирован и реализован экспериментальный образец антенны фрактальной конфигурации на основе кривой Гильберта, предназначенный для использования в составе стационарных базовых станций сети радиосвязи с использованием RoF. Отклонение экспериментальных характеристик от расчетных не превысило 5%, что подтвердило адекватность и достаточную точность предложенных моделей и методики проектирования многодиапазонных антенных систем.

Проведены экспериментальные исследования макета фрагмента сети RoF. Измерялись следующие характеристики канала: - время задержки кадра, - потери кадров, - отношение С/Ш. Все характеристики измерялись как на БС, так и на абонентском комплекте (АК). Результаты измерений, проводимых со сторон БС и АК, практически идентичны, кроме отношения С/Ш. Последнее обстоятельство связано с локализацией источников промышленных помех вблизи БС. Оценены уровни сигнала, при которых начинает существенно сказываться наличие промышленных помех. В качестве примера на рис. 8 приведена зависимость потерь кадров в приемнике АК от мощности передатчика АК, а на рис. 9 – зависимость отношения С/Ш от мощности передатчика АК при наличии или отсутствии промышленных помех.

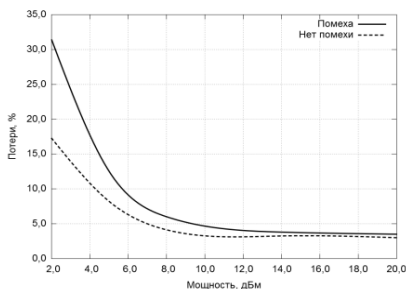


Рис. 8 – Зависимость потерь кадров от мощности передатчика АК

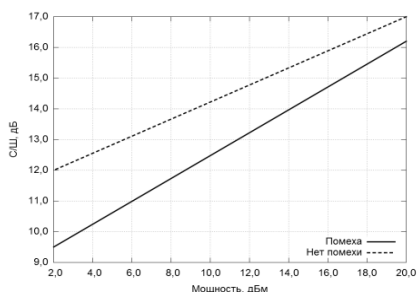


Рис. 9 – Зависимость отношения С/Ш от мощности передатчика АК

Проведена оценка кроссполаризационной характеристики в условиях реальной трассы, которая показала, что эффект деполаризации имеет место, хотя кроссполаризационная развязка остается достаточно высокой.

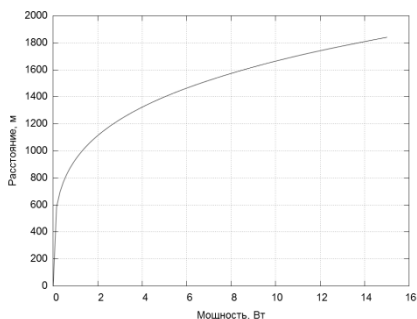


Рис. 10 – Зависимость расстояния от мощности передатчика АК

Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить значения радиусов зон обслуживания БС при различных исходных данных. На рис. 10 приведен график зависимости расстояния между БС и АК (радиуса зоны обслуживания) от мощности передатчика АК при фиксированной мощности БС.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность решений, основанных на технологии RoF, и обеспечили возможности прогнозирования характеристики систем связи с RoF при различных вариантах их построения.

В **Заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В **Приложении А** представлены результаты экспериментальных исследований макета фрагмента сети RoF.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертационного исследования разработаны научно-технические основы создания МКК СПРС на базе технологии RoF и обеспечения их эффективного функционирования. Разработаны основные требования к подобным сетям. Обоснована перспективность совершенствования архитектуры МКК СПРС на основе использования технологии RoF и воз-

можность в этом случае отказаться от установки оборудования криптоимитозащиты на базовых станциях. Обоснованы архитектура и состав сети и требования к составу оборудования.

Рассмотрены вопросы дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну, обеспечивающей существенную экономию ресурса оптических линий при построении сети. Разработана модифицированная математическая модель дуплексной передачи. Проведен анализ вариантов подавления связи между оптическими передатчиками. Получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров качества передачи сигналов в волоконно-оптической линии связи МКК СПРС на базе технологии RoF в дуплексном режиме. Определены оптимальные условия дуплексной передачи сигналов RoF по одному оптическому волокну и способы их обеспечения.

На основе решения внешних задач электродинамики, с использованием разработанных автором алгоритмов автоматизированного построения геометрии фрактальных структур, разработана методика проектирования многодиапазонных антенн базовых станций в виде сложных проволочных и плоскостных фрактальных структур. Определены возможные пути построения многодиапазонных антенн базовых станций для различных условий применения. Проведены расчетные и экспериментальные исследования характеристик антенн, подтвердившие их перспективность для создания многодиапазонных базовых станций.

Проведены экспериментальные исследования макета фрагмента сети RoF. Получены новые результаты исследований, подтвердившие состоятельность и эффективность предлагаемых решений по совершенствованию архитектуры сетей и входящих в них устройств.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Нарышкин, М.И. Концепция построения распределенной сети радиосвязи на базе технологии Radio-over-Fiber [Текст] / М.И. Нарышкин // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – №4. – С.432-439.
2. Андреев, В.А. Применение полупроводниковых оптических усилителей в системах "Radio-over-Fiber" телекоммуникационных сетей [Текст] / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, М.И. Нарышкин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №11. – С.14-18.
3. Бузов, А.Л. Исследование антенн на основе фрактальных структур для узлов мобильного радиодоступа сетей RoF [Текст] / А.Л. Бузов, С.А. Букашкин, М.И. Нарышкин // Радиотехника. – 2016. – №4. – С.87-92.
4. Кубанов В.П. Построение корпоративных сетей подвижной радиосвязи на основе технологии RoF [Текст] / В.П. Кубанов, М.И. Нарышкин, А.И. Тяжев // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – №4. – С.422-429.
5. Нарышкин, М.И. Фрактальные антенны для базовых станций разветвленных корпоративных сетей подвижной радиосвязи [Текст] / М.И. Нарышкин // Антенны. – 2017. – №1. – С.22-27.
6. Нарышкин, М.И. Антенны для передвижных базовых станций подвижной радиосвя-

зи на основе структур сложной конфигурации [Текст] / М.И. Нарышкин // Антенны. – 2017. – №2. – С.14-21.

7. Букашкин, С.А. Экспериментальное исследование фрагмента корпоративной сети подвижной радиосвязи на основе технологии RoF [Текст] / С.А. Букашкин, М.И. Нарышкин // Радиотехника. – 2017. – №4. – С.98-102.

8. Нарышкин, М.И. Исследование вопросов дуплексной передачи сигналов в сетях подвижной радиосвязи на базе RoF по одному оптическому волокну [Текст] / М.И. Нарышкин // Радиотехника. – 2017. – №4. – С.109-115.

Труды научных конференций:

9. Бузов, А.Л. Пути создания антенн базовых станций и узлов мобильного радиодоступа, не искажающих архитектурный облик объекта установки [Текст] / А.Л. Бузов, С.А. Букашкин, М.И. Нарышкин // Материалы XXIII Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2016. – С.167.

10. Нарышкин, М.И. Результаты экспериментального исследования параметров качества радиоканала для системы RoF в условиях городской местности [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации». – Красноярск, 2016. – С.326-329.

11. Нарышкин, М.И. Пути построения распределенных малоканальных корпоративных сетей подвижной радиосвязи [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Самара, 2016. – С.492-493.

12. Нарышкин, М.И. Компактная антенна базовой станции распределенной сети специальной подвижной радиосвязи [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций». – Самара, 2016. – С.576-577.

13. Нарышкин, М.И. Антенна базовой станции подвижной радиосвязи на основе фрактальной структуры [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – Самара, 2016. – С.60-62.

14. Нарышкин, М.И. Модель дуплексной передачи информации по одному оптическому волокну без подавления взаимосвязи между передатчиками [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы XIV международной научной конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях». – Самара, 2016. – С.200-201.

15. Аронов, В.Ю. Модификация программных комплексов электродинамического анализа для расчета антенн на основе фрактальных структур [Текст] / В.Ю. Аронов, М.В. Загвоздкин, М.И. Нарышкин // Материалы XXIV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2017. – С.184.

16. Нарышкин, М.И. Методика проектирования многочастотных антенн сложной конфигурации [Текст] / М.И. Нарышкин // Материалы XXIV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. – Самара, 2017. – С.203.

Подписано в печать 26.04.2017 г.

Формат 60 x 84/16. Бумага ксероксная. Печать оперативная.

Объем – 1 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1273.

Отпечатано в типографии ООО «Новая страница»

443022, г. Самара, пр. Кирова, 26, оф. 9; тел.: 229-23-20.