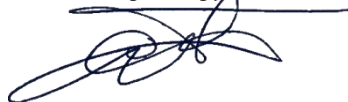


На правах рукописи



Беляев Сергей Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИЗЛУЧАЮЩИХ И
ИЗЛУЧАЮЩЕ-ЭКРАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ И СЕТЕВЫХ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ ЗАЩИЩЕННЫХ СЕТЕЙ**

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 – 2018

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 **Бузов Александр Львович**

Официальные оппоненты:

Радионов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород. Заведующий кафедрой «Общая и ядерная физика».

Воловач Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти. Заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань.

Защита диссертации состоится 22.06.2018 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 " __ " _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219. 003.02,
доктор технических наук, профессор



А.И. Тяжев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Защищенные беспроводные локальные сети (вычислительные, радиосвязи, радиодоступа и др.) все интенсивнее используются и развиваются в составе ведомственных, корпоративных и специальных систем связи и управления. Они играют важную роль в обеспечении связи, управления (организациями, предприятиями, войсками, технологическими процессами, отдельными объектами), получения и обработки информации и т.д. Совершенно незаменимыми они становятся в тех чрезвычайно распространенных в последнее время приложениях, когда терминальные устройства в составе сети являются подвижными (носимые и возимые пользовательские универсальные и специализированные терминалы, оборудование пилотируемых и беспилотных наземных, водных и воздушных подвижных объектов различного назначения и др.).

Во всех перечисленных случаях одним из важнейших требований к защищенной беспроводной сети является надежная защита от несанкционированного доступа к информации, навязывания ложной информации и других деструктивных воздействий на сеть. Наряду с обязательным применением в связи с этим крипто- и имитозащиты передаваемой в сети информации, в современных условиях все чаще требуются и используются дополнительные меры защиты информации. Однако применительно к беспроводным сетям, в которых информация передается по радиоканалу, многие традиционные меры защиты, например, использование источников активных помех непосредственно в контролируемой зоне, принципиально неприменимы. Необходимо, таким образом, научно обоснованные решения, обеспечивающие дополнительную защиту информации, передаваемой по радиоканалам.

Существенной особенностью современных сетей является их мульти-сервисность и связанный с ней сложный характер трафика передаваемых разнородных сообщений, в том числе – реального времени, что, в свою очередь, предполагает необходимость повышения качества обслуживания как важнейшего показателя назначения сети за счет разработки новых решений в области управления трафиком с учетом свойств трафика для конкретных типов сетей.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная **научно-техническая проблема** создания беспроводных защищенных сетей с улучшенными характеристиками назначения и радиоэлектронной защиты.

Степень разработанности темы исследования

Беспроводные сети широко используются для предоставления телекоммуникационных услуг с территориальным охватом глобально/национального, городского, локального и персонального уровня.

Значительный вклад в развитие принципов анализа сетей связи внесли А.С. Аджемов, В.М. Вишнеvский, А.И. Колыбельников, В.Г. Карташевский,

Б.С. Гольдштейн и др. В области электромагнитного экранирования, антенной техники и антенной электродинамики следует выделить работы Аполлонского С.М., Бузова А.Л., Гроднева И.И., Маркова Г.Т., Миттры Р., Сазонова Д.М., Неймарка А.В., Хансена Р.С., Шапиро Д.Н. и др.

В целях обеспечения информационной безопасности в защищенных беспроводных сетях используются технологии шифрования, а также технологии аутентификации, однако с точки зрения защиты информации все используемые беспроводными сетями протоколы в той или иной степени уязвимы.

Одной из существенных современных тенденций является интенсивный рост мультимедийного трафика (речь, видео и др.), в том числе – и в локальных сетях, что предъявляет жесткие требования к синхронности передаваемых сообщений.

В настоящее время интенсивно разрабатываются новые механизмы поддержки качества обслуживания, мониторинга и управления сетью. Ведутся исследования в области анализа характеристик трафика, в том числе с учетом его самоподобия. Методики по управлению трафиком освещены в работах А.Е. Кучерявого, Л. Клейнрока, Н.А. Соколова, Д.В. Тарасова, В.В. Фомина, И.В. Шахновича, Г.Г. Яновского, В. Шринвае и др. Однако результаты подобных исследований применительно к специфике защищенных беспроводных сетей в открытых источниках до настоящего времени не представлены.

Создание перспективных защищенных беспроводных локальных вычислительных сетей предполагает комплексное решение задач обеспечения высокого качества обслуживания и минимизации уровней излучения за пределы зоны размещения сегмента сети. Наиболее целесообразным представляется применение в данном случае методов решения электродинамических задач на основе комбинирования метода интегральных уравнений и приближенных асимптотических методов и реализующего указанные комбинированные методы программного комплекса электродинамического моделирования ПК Scater.

Таким образом, анализ литературы показал, что вопросы создания беспроводных защищенных сетей с улучшенными характеристиками назначения и радиоэлектронной защиты, включая разработку методик их проектирования, до настоящего времени разработаны недостаточно.

Цель диссертационной работы – исследование и разработка решений по созданию сегментов беспроводных сетей с обеспечением высокого качества обслуживания и минимальных уровней излучения за пределы зоны размещения.

Программа исследований:

- обоснование целей, задач и методов исследований;
- исследование вероятностно-временных характеристик трафика беспроводной защищенной сети и способов управления трафиком;

- исследование возможностей одновременной передачи аналоговых и цифровых сигналов при использовании технологии RoF;
- разработка модели и методики проектирования излучающе-экранирующих систем, обеспечивающих минимизацию уровней излучения за пределы зоны размещения;
- исследование излучающе-экранирующих систем для беспроводных защищенных сетей на основе сосредоточенных и распределенных излучателей;
- исследование и разработка излучающих систем на основе антенн со специальными формами характеристик направленности;
- экспериментальные исследования макетов оборудования сети.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана комбинированная электродинамическая модель излучающе-экранирующей системы, позволяющая существенно сократить ресурсоемкость расчетов и предусматривающая решение электродинамической задачи для внутренней области, ограниченной экранирующей структурой, и расчет внешнего поля с учетом электрофизических характеристик экрана.

2. Разработана методика проектирования излучающе-экранирующих систем для сегментов беспроводной защищенной сети, обеспечивающая требуемую равномерность распределения поля в зоне размещения и приемлемый уровень излучения за пределами этой зоны, и включающая выбор типа излучающей структуры, расчет поля в пределах и за пределами зоны размещения на основе предложенной комбинированной модели, оптимизацию размещения и параметров излучателей по критерию обеспечения равномерного покрытия, расчет характеристик экрана, обеспечивающего непревышение заданного уровня поля вне зоны размещения.

3. Получены новые результаты исследования излучающих и излучающе-экранирующих систем на основе сосредоточенных излучателей, распределенных излучателей и антенн со специальными формами характеристик направленности, обеспечивающие обоснованный выбор типов, параметров и размещения излучателей при проектировании.

4. Методами математического моделирования показано, что трафик беспроводной защищенной сети является самоподобным, получены характеристики трафика, определены соответствующие плотности вероятностей, установлена существенная корреляция между информационными последовательностями на уровнях доступа и агрегации и ее зависимости от интенсивности трафика и длины пакетов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в расширении и углублении знаний:

- в области теории и техники антенн, применительно к которой введен в научный обиход новый комплексный объект исследований – излучающе-

экранирующие системы, разработаны их математические модели, методы анализа и проектирования;

- в области теории и техники телекоммуникационных сетей, где доказано самоподобие трафика беспроводной защищенной сети и исследованы его вероятностно-временные характеристики.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- методика проектирования излучающе-экранирующих систем для сегментов беспроводной защищенной сети, обеспечивающих требуемую равномерность распределения поля в зоне размещения и приемлемый уровень излучения за пределами этой зоны, а также полученные результаты исследований этих систем открывают возможность создания сегментов (кластеров) нового поколения беспроводных сетей различной принадлежности и назначения с существенно улучшенными характеристиками радиоэлектронной защиты;

- результаты исследования вероятностно-временных характеристик трафика беспроводной защищенной сети с учетом его самоподобия позволят повысить качество предоставления услуг в перспективных сетях;

- результаты исследования возможностей одновременной передачи аналоговых и цифровых сигналов при использовании технологии RoF позволят реализовать дополнительные функции по передаче трафика на базе действующих транспортных сетей.

Практическая значимость работы подтверждается результатами внедрения отдельных положений и выводов диссертации на предприятиях России. Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Соответствие рассматриваемым специальностям

Диссертационная работа **соответствует** п. 4, 10 паспорта специальности 05.12.13 и п. 1, 3 паспорта специальности 05.12.07.

Методология и методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались методы математического моделирования, вычислительной электродинамики, теории антенн, математической статистики, теории вероятностей, теории массового обслуживания. Использовались программные средства электродинамического моделирования, сбора и обработки трафика, эмуляции потоков.

Степень достоверности результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается корректностью использованных методов и адекватностью построенных на их основе расчетных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается хорошим соответствием расчетных и экспериментальных данных, а также полученными практическими результатами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комбинированная электродинамическая модель излучающе-экранирующей системы, предусматривающая строгое решение электроди-

намической задачи для внутренней области и расчет внешнего поля с учетом электрофизических характеристик экрана.

2. Методика проектирования излучающе-экранирующих систем для сегментов беспроводной защищенной сети, обеспечивающая требуемую равномерность распределения поля в зоне размещения и приемлемый уровень излучения за пределами этой зоны.

3. Результаты исследования излучающих и излучающе-экранирующих систем на основе сосредоточенных излучателей, распределенных излучателей и антенн со специальными формами характеристик направленности.

4. Результаты исследования самоподобного трафика беспроводной защищенной сети, включая зависимости корреляции между информационными последовательностями от интенсивности трафика и длины пакетов.

5. Доказательство возможности одновременной дуплексной передачи аналоговых и цифровых сигналов по одному оптоволокну при использовании технологии RoF.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационного исследования **докладывались** на XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» (Самара, 2016, Казань, 2017), IV Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь» (Омск, 2017), III и IV Всероссийских научно-технических конференциях «Системы связи и радионавигации» (Красноярск, 2016, 2017), XXIV и XXV Российских научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 2017, 2018).

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) **опубликовано** 17 печатных трудов, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК, раздел научной монографии, вышедшей в центральном издательстве, 1 статья в журнале и 11 публикаций в форме тезисов докладов на международных и российских конференциях.

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 и списка литературы. Общий объем работы составляет 172 страницы, включая 78 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 134 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указана степень ее разра-

ботанности, сформулированы цель и программа исследований, показаны научная новизна и теоретическая и практическая значимость работы, указано соответствие рассматриваемым специальностям, указаны используемые методы исследований, показана степень достоверности результатов, приведены положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов работы, описана реализация результатов работы.

Раздел 1 посвящен обоснованию целей, задач и методов исследований.

Выполнен анализ архитектуры и особенностей локальных беспроводных защищенных сетей и основных требований к ним. Обоснована необходимость применения для надежного радиопокрытия сложного объекта комбинированных решений, предусматривающих использование различных типов излучающих систем.

Проанализированы концептуальные предложения по созданию перспективных защищенных систем связи и их беспроводных кластеров, включая основные требования к сетям и концепцию защиты информации. Обоснована перспективность экранирования зон работы кластера беспроводной сети в компактных и протяженных помещениях (сооружениях) и применения антенн с диаграммами направленности специальной формы – для кластеров, развернутых на открытой местности.

Проведен анализ существующих методов исследования и управления трафиком в локальной вычислительной сети. Отмечено, что с появлением в сетях функций обработки мультимедийной информации потребовались изменения протоколов сетевых операционных систем и коммуникационного оборудования, связанные с чувствительностью такой информации к задержкам при передаче пакетов данных.

Рассмотрены главные требования, предъявляемые к вычислительным сетям, включая требование выполнения сетью основной задачи предоставления заданного набора услуг и требования производительности, надежности, совместимости, управляемости, защищенности, расширяемости и масштабируемости, связанные с качеством выполнения основной задачи.

Выполнен анализ существующих решений излучающих и экранирующих систем для обеспечения радиодоступа в компактных и протяженных помещениях, и обоснован выбор методов и программных средств их анализа. Показано, что основными вариантами являются использование антенных систем с особыми формами диаграмм направленности и эффективных методов и средств экранирования. Обоснована перспективность подхода на основе комбинированных методов решения электродинамических задач с разбиением задачи на две связанные, причем в рамках внутренней задачи экран представляет собой бесконечно тонкую идеально проводящую поверхность, а при решении внешней задачи экранируемый объем представляется бесконечно тонким идеально проводящим экраном, на котором действует эквивалентный поверхностный источник.

Раздел 2 посвящен исследованию вопросов подачи сигналов и управ-

ления трафиком.

Были исследованы статистические характеристики мультимедийных потоков сети, передаваемых с использованием беспроводных технологий. Сбор статистических данных осуществлялся с использованием программы-снифера WireShark. Полученные гистограммы приведены на рис. 1.

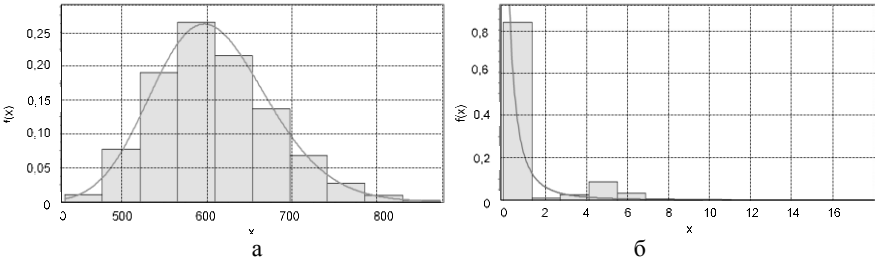


Рис. 1 – Гистограммы распределений случайных значений интенсивностей трафика на уровнях агрегации (а) и доступа (б)

Гистограмма рис. 1, а) может быть аппроксимирована логонормальным распределением:

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-\mu)-\mu}{\sigma}\right)^2\right)}{(x-\mu)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

при $\sigma = 0,15$; $\mu = 6,2$; $\gamma = 100$, а гистограмма рис. 1, б) – обобщенным распределением Паретто:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-1/k} & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right) & k = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

при $k = 0,66$ $\sigma = 0,32$; $\mu = -0,12$.

Соответствующие одномерные плотности вероятностей для последовательностей случайных интервалов времени между пакетами и длин пакетов приведены на рис. 2. Гистограмма рис. 2, а) аппроксимируется распределением Коши ($\sigma = 0,022$ и $\mu = 0,175$), а гистограмму рис. 2, б) аппроксимируем смесью распределения Вейбулла и дельта-функции в точке пика в области больших значений x_0 :

$$f(x) = 0,09 \cdot \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right) + 0,91 \cdot \delta(x-x_0), \quad x_0 = 1350. \quad (3)$$

Таким образом, имеются весьма сильные корреляционные связи, которыми нельзя пренебречь. Анализ статистических характеристик трафика сети, показал, что данный трафик обладает всеми признаками самоподобия.

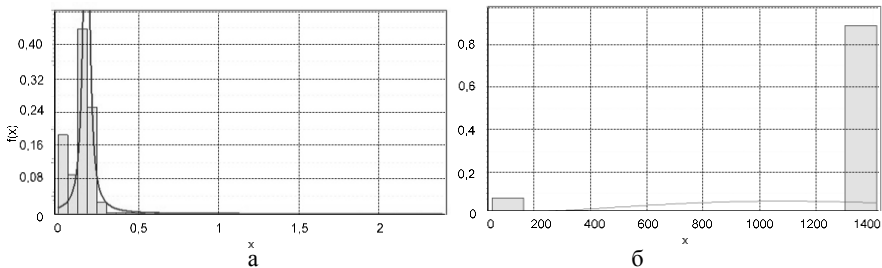


Рис.2 – Гистограммы распределений интервалов времени между пакетами (а) и длин пакетов (б)

Рассмотрены реализации основных подходов по управлению современным трафиком с учетом его самоподобного характера методами моделирования в среде программы NS2. Были исследованы и сопоставлены два подхода по обеспечению качества обслуживания: Best Effort Service (негарантированная доставка данных, дисциплина очереди FIFO) и DiffServ (дифференцированное обслуживание, процедура управления очередью WRED). В качестве обрабатываемого трафика был использован on-off поток, параметр Херста H которого изменялся от 0,1 до 0,9. По результатам моделирования были определены параметры, характеризующие качество функционирования сети: доля потерянных пакетов, задержка и джиттер. При этом для процедуры WRED рассматривались три варианта настройки границ очереди и вероятности сброса (условно: step 1, step 2, step 3). Определенный по результатам моделирования относительный выигрыш при использовании WRED по сравнению с FIFO иллюстрирует рис. 3.

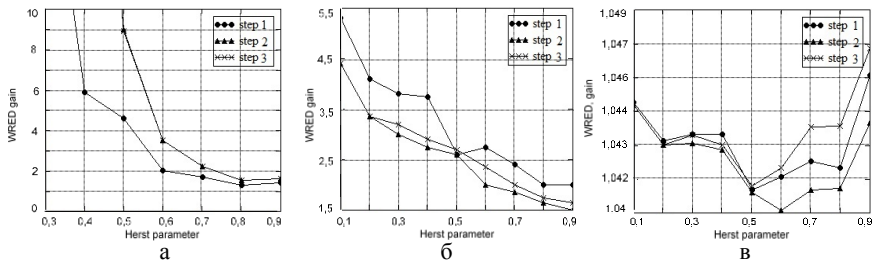


Рис. 3 – WRED/FIFO: относительный выигрыш в статистике отброшенных пакетов (а), задержке при передаче пакета (б) и джиттере (в)

Таким образом, алгоритм WRED предпочтителен в широком диапазоне значений параметра Херста. Кроме того, возможность гибкой настройки параметров WRED позволяет эффективно управлять трафиком разнородных

сетей, где для каждого типа трафика необходим индивидуальный подход к обеспечению качества обработки потока.

Исследованы возможности одновременной передачи аналоговых и цифровых сигналов при использовании технологии RoF.

В результате моделирования были получены глаз-диаграммы, анализ которых показал, что при увеличении длины оптического волокна имеет место меньшее влияние паразитной связи между передатчиками. Кроме того, был определен Q-фактор и соответствующий ему коэффициент ошибок.

По результатам исследований обоснована возможность при построении беспроводной защищенной сети связи использовать одно оптоволокно для одновременной реализации дуплексных каналов RoF и других цифровых каналов.

В разделе 3 приведены результаты разработки и исследования излучающих и излучающе-экранирующих систем, обеспечивающих минимизацию уровней излучения за пределы зоны обслуживания.

Разработана комбинированная электродинамическая модель излучающе-экранирующей системы, основанная на разбиении задачи на две связанные, с моделированием экрана в рамках внутренней задачи как идеально проводящей поверхности, а в рамках внешней задачи – как поверхности с распределенным эквивалентным поверхностным источником, характеристики которого определяются решением внутренней задачи и коэффициентом прозрачности экрана.

На основе предложенной комбинированной модели разработана методика проектирования излучающе-экранирующих систем, обеспечивающих минимизацию уровней излучения за пределы зоны размещения.

Методика состоит из следующих основных этапов:

- проектирование излучающей системы;
- проектирование экранирующей системы;
- разработка комбинированной электродинамической модели излучающе-экранирующей системы как единого целого;
- расчет электродинамических характеристик излучающе-экранирующей системы.

При использовании комбинированной электродинамической модели следует записывать интегральные уравнения для конкретной излучающе-экранирующей системы. Например, в случае наличия плоскости XY поверхности (стены) интегральное уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} \vec{s}_z \vec{E}^0(x, y, z) = i\omega\mu_0 \vec{s}_z \int_{XY} G(x, y, x', y') \vec{j}(x', y') dx dy - \\ - \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \vec{s}_z \text{grad} \int_{XY} G(x, y, x', y') \text{div} \vec{j}(x', y') dx dy. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично соотношение в рамках метода физической оптики принимает следующий вид:

$$\vec{j}(x, y) = 2[\vec{n}_z \times \vec{H}(x, y, z)] \quad (5)$$

По результатам моделирования осуществлялась корректировка модели, в результате которой уточнялись параметры излучающе-экранирующей системы.

Выполнено исследование излучающе-экранирующих систем для беспроводных защищенных сетей на основе сосредоточенных излучателей.

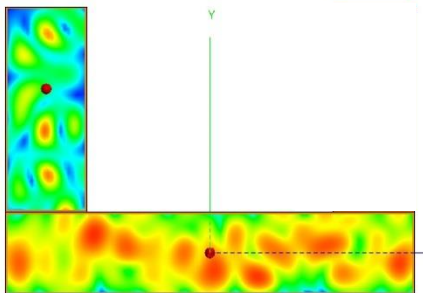


Рис. 4 – Распределение электромагнитного поля в помещении для случая двух излучателей

Представлены нормированные распределения электромагнитных полей для различных вариантов расположения излучателей, а также для различных частотных диапазонов. В качестве примера на рис. 4 представлено распределение электромагнитного поля для случая расположения двух излучателей в центрах симметрии большего и меньшего примитивов

для частоты 300 МГц. Проведенные исследования показали, что для рассмотренных типов помещений первоочередную роль играет не расположение источников, а частота.

На основании анализа полученных результатов была определена зависимость распределения электромагнитного поля от расположения системы излучателей и частотного диапазона, позволяющая получать требуемое распределение поля, соответствующее заданному критерию обеспечения связи, например, минимальному значению провалов в рассматриваемой области.

Проведено исследование излучающе-экранирующих систем для беспроводных защищенных сетей на основе распределенных излучателей для помещений со сложной геометрической формой. Приведены результаты распределения электромагнитного поля в помещении для системы распределенных излучателей (излучающего кабеля).

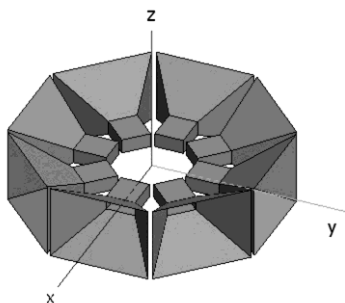


Рис. 5 – Антенная решетка на основе рупорных излучателей

Выполнено исследование и разработка излучающих систем на основе антенн со специальными формами характеристик направленности.

Разработаны электродинамические модели таких антенных систем, в частности, одно- и двухъярусных рупорных антенных систем, обеспечивающие высокую направленность во всех азимутальных направлениях. В качестве примера на рис. 5 показан макет кольцевой антенной решетки на основе рупорных излучателей. Получены их импедансные характеристики и ха-

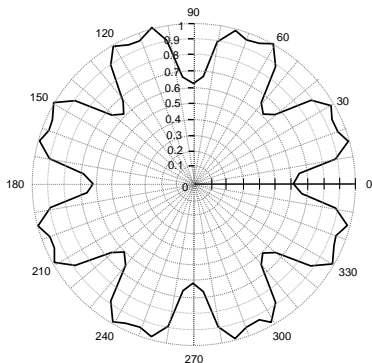


Рис. 6 – ДН антенной решетки

характеристики направленности. На рис. 6 представлена обобщенная диаграмма направленности (ДН) такой антенны в горизонтальной плоскости.

Приведены результаты исследований по формированию определенной формы сечения луча диаграммы направленности. Представлены несколько вариантов антенных систем со специальными формами диаграмм направленностей.

Раздел 4 посвящен экспериментальным исследованиям макетов оборудования беспроводной защищенной связи.

Проведено экспериментальное исследование двухъярусной рупорной антенны, спроектированной и реализованной в соответствии с представленными электродинамическими моделями излучающих систем со специальными формами характеристик направленности.

Получены характеристики данной рупорной антенны, а именно коэффициент отражения и КСВН. На рис. 7 представлены расчетные и экспериментальные частотные зависимости КСВН.

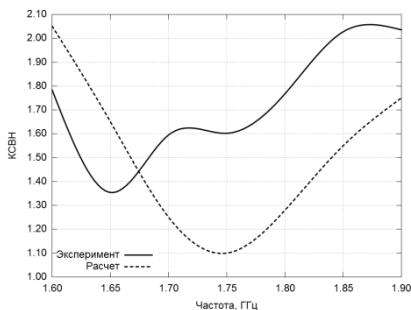


Рис. 7 – Частотные зависимости КСВН двухъярусной антенны

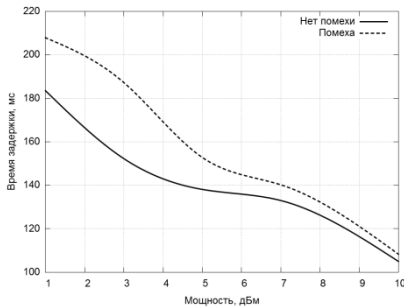


Рис. 8 – Зависимость среднего времени задержки кадра от мощности передатчика БС

Проведено экспериментальное исследование участка беспроводной защищенной сети на основе технологии RoF, обеспечивающей одновременное функционирование цифровых каналов связи.

Представлены результаты измерений характеристик беспроводной защищенной сети на базе RoF в условиях различной помеховой обстановки. В качестве примера на рис. 8 приведена зависимость среднего времени задержки кадра от мощности передатчика БС с учетом стационарного оборудования. Показано, что наличие промышленных помех оказывает небольшое влияние на характеристики сети связи.

Выполнена качественная оценка телефонной связи. Установлено, что даже в наихудшем случае обеспечивался достаточный класс качества речи, а также приемлемая узнаваемость.

В результате сравнения полученных характеристик беспроводной защищенной сети связи с характеристиками сети на базе RoF, полученными другими авторами для отдельно работающего дуплексного канала, было установлено отсутствие существенного взаимного влияния между цифровыми каналами и каналами RoF.

В Заключение сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Показано, что трафик беспроводной защищенной сети является самоподобным, получены характеристики трафика, определены соответствующие плотности вероятностей, установлена существенная корреляция между информационными последовательностями на уровнях доступа и агрегации и ее зависимости от интенсивности трафика и длины пакетов.

Получены новые результаты исследования возможностей управления трафиком сети в зависимости от параметра самоподобия, обоснованы возможности эффективного управления разнородным трафиком сети.

Разработана комбинированная электродинамическая модель излучающе-экранирующей системы, позволяющая существенно сократить ресурсоемкость расчетов. Разработана методика проектирования излучающе-экранирующих систем для сегментов беспроводной защищенной сети, обеспечивающая требуемую равномерность распределения поля в зоне размещения и приемлемый уровень излучения за пределами этой зоны.

Разработаны и исследованы новые решения излучающих и излучающе-экранирующих систем на основе сосредоточенных излучателей, распределенных излучателей и антенн со специальными формами характеристик направленности, обеспечивающие обоснованный выбор типов, параметров и размещения излучателей при проектировании.

Проведено экспериментальное исследование двухъярусной рупорной антенны, спроектированной и реализованной в соответствии с представленными электродинамическими моделями излучающих систем со специальными формами характеристик направленности. Представлены новые результаты измерений характеристик беспроводной защищенной сети на базе RoF в условиях различной помеховой обстановки.

Направления дальнейших исследований обусловлены необходимостью разработки перспективных технических решений указанных систем, в том числе – на основе использования инновационных технологий и материалов (метаматериалов). В области сетевых решений необходимы исследования и разработки в целях дальнейшего совершенствования методов управления трафиком, а также комплексные решения по архитектуре, топологии

и оборудованию сетей на основе технологии RoF.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Беляев, С.О. Антенны на основе сосредоточенных излучателей, применяемые в беспроводных защищенных локальных вычислительных сетях [Текст] / С.О. Беляев, А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин // Радиотехника. – 2017. – № 4. – С. 77 – 80.
2. Беляев, С.О. Исследование антенн со специальными формами характеристик направленности [Текст] / С.О. Беляев, Д.А. Копылов, В.Ю. Назин, С.С. Телегин // Антенны. – 2017. – № 10. – С. 31 – 35.
3. Бадалов, В.В. Исследование характеристик антенных систем на основе использования метаматериалов в целях обеспечения электромагнитной совместимости средств радиосвязи [Текст] / В.В. Бадалов, С.О. Беляев, Д.А. Копылов, А.М. Нещерет // Антенны. – 2017. – № 11. – С. 31 – 38.
4. Беляев, С.О. Методика проектирования излучающе-экранирующих систем, обеспечивающих минимизацию уровня излучения за пределы зоны обслуживания [Текст] / С.О. Беляев // Радиотехника. – 2018. – № 4 – С. 82 – 86.
5. Беляев, С.О. Излучающе-экранирующие системы для беспроводных защищенных сетей на основе сосредоточенных и распределенных излучателей [Текст] / С.О. Беляев // Радиотехника. – 2018. – № 4 – С. 77 – 81.

В других изданиях:

6. Беляев, С.О. Новый взгляд на ИКМ [Текст] / С.О. Беляев // Вестник связи. – 1997. – № 3. – С. 17 – 19.
7. Букашкин, С.А. Методы анализа качества обслуживания сетевого трафика при использовании протокола управления: Раздел монографии [Текст] / С.А. Букашкин, В.Г. Карташевский, М.А. Буранова, В.В. Фомин, А.В. Сапрыкин, С.О. Беляев // Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. Монография / Под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. – М.: Радиотехника, 2017. – 448 с.
8. Беляев, С.О. Возможности создания быстроразворачиваемых антенных систем на основе гибких формообразующих конструкций с пневматическим приводом [Текст] / С.О. Беляев // Тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации» (22 – 23 сентября 2016 г.). – Красноярск, 2016. – С. 300 – 303.
9. Беляев, С.О. Анализ характеристик трафика сети специального назначения [Текст] / С.О. Беляев, М.А. Буранова // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТИТТ-16: Материалы XVII Международной научно-технической конференции (Самара, 22 – 24 ноября 2016 г.). – Самара: ПГУТИ, 2016. – С. 260 – 261.
10. Беляев, С.О. Моделирование сети MPLS при обработке трафика системой G/D/1 [Текст] / С.О. Беляев, М.А. Буранова. // XXIV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 30.01.17 – 3.02.17): Материалы конференции. – Самара, 2017. – С. 187.
11. Беляев, С.О. Антенные системы беспроводных защищенных локальных вычислительных сетей [Текст] / С.О. Беляев, А.Л. Бузов, Ю.И. Кольчугин // XXIV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ (ПГУТИ, 30.01.17 – 3.02.17): Материалы конференции. – Самара, 2017. – С. 188.
12. Беляев, С.О. Экспериментальная проверка возможности одновременной дуплексной передачи основного цифрового сигнала и аналогового сигнала RoF по одному оптоволокну [Текст] / С.О. Беляев // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции (г. Красноярск, 12-13 октября 2017 г.). – Красноярск:

АО «НПП «Радиосвязь», 2017. – С. 277 – 280.

13. Бадалов, В.В. Перспективы использования гиротропных метаматериалов в антенных устройствах [Текст] / В.В. Бадалов, С.О. Беляев, Д.А. Копылов, А.М. Нещерет // Системы связи и радионавигации: сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции (г. Красноярск, 12-13 октября 2017 г.). – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2017. – С. 298 – 300.

14. Беляев, С.О. Анализ и управление сетевым трафиком в мультисервисной сети [Текст] / С.О. Беляев, А.В. Сапрыкин // IV Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь». – Омск, 2017. – С.284 – 289.

15. Беляев, С.О. Формирование характеристик направленности антенн при особых требованиях к форме зоны покрытия [Текст] / С.О. Беляев, Д.А. Копылов, В.Ю. Назин // Международная научно-техническая конференция «Радиотехника, электроника и связь». – Омск, 2017. – С.245 – 249.

16. Беляев, С.О. Моделирование побочных электромагнитных излучений из экранированных помещений с учетом конечной прозрачности экранов [Текст] / С.О. Беляев // II научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии». XVIII Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т.2. – С. 166 – 169.

17. Беляев, С.О. Экспериментальные исследования макетов фрагментов защищенной локальной сети [Текст] / С.О. Беляев // XXV Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ФГБОУ ВО ПГУТИ: Материалы конференции. – Самара, 2018.

Подписано в печать 18.04.2018 г.

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

Объем – 1 усл. п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 237.

Отпечатано в типографии ООО «Новая страница»
443022, г. Самара, пр. Кирова, 26, оф. 9; тел.: 229-23-20.