

На правах рукописи



Викулов Антон Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТЕЙ
БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА СТАНДАРТА IEEE 802.11**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича" на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук,
Парамонов Александр Иванович

Официальные
оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ОАО "Центральное научно-производственное
объединение "Ленинец", главный специалист,
заместитель Главного конструктора

Сахарова Мария Александровна,
кандидат технических наук,
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научно-исследовательский отдел по разработке
систем связи, заместитель начальника отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие "Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский институт
радио имени М.И. Кривошеева, Москва

Защита состоится 12 февраля 2020 года в 14.00 на заседании
диссертационного совета Д 219.004.04, созданного при федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
образования «Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-
Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу
Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 10 января 2020 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 219.004.04,
д-р техн. наук



А.И. Парамонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Появившиеся в конце 90-х годов XX века беспроводные локальные вычислительные сети (БЛВС) стандарта IEEE 802.11 прошли длительный процесс развития и в конце второго десятилетия XXI века продолжают бурно развиваться. БЛВС стандарта IEEE 802.11 во многом определяют технологический состав современных сетей радиодоступа наравне с такими технологиями как сети 3G, LTE, WiMAX и др.

В настоящий момент сети IEEE 802.11 имеют обширное применение в корпоративном секторе, в публичных сетях операторов связи и различных персональных устройствах домашнего применения, решая широкий спектр задач по передаче данных – от обеспечения работы бизнес-критичных приложений до индустрии развлечений. При этом в свете ожидаемого перехода к сетям пятого поколения (5G), в отрасли сильны тенденции по интеграции различных технологий доступа с ЛВС. В частности, уже сегодня операторами связи широко применяется практика выгрузки (offload) трафика сотовой связи в локальные сети, и, в том числе, стандарта IEEE 802.11 с целью разгрузки сотовой сети общего пользования, где доступный диапазон частот и его возможности по передаче трафика сильно ограничены.

Таким образом, в инженерной и проектной практике как никогда актуальными являются проблемы обеспечения решения проектных задач соответствующими расчетными и аналитическими методами. Отметим, что стандарт IEEE 802.11 не регламентирует все возможные алгоритмы, оставляя их на усмотрение конкретных программно-аппаратных реализаций производителей.

Актуальными в данный момент дополнениями стандарта являются, в зависимости от используемого частотного диапазона, IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac. В 2020 году ожидается принятие новейшего дополнения IEEE 802.11ax. Предлагаемые в работе модели и методы в полной мере могут быть применены и к исследованию сетей IEEE 802.11ax.

Степень разработанности темы. Вопросы анализа БЛВС стандарта IEEE 802.11 всегда являлись важнейшими объектами исследований. Среди работ отечественных и зарубежных авторов можно отметить труды А.Е. Кучерявого, А.И. Ляхова, Е.А. Кучерявого, В.М. Вишневого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, М.А. Сиверса, В.Г. Карташевского, В.К. Сарьяна, G. Bianchi, В. Ginzburg и других ученых. В этих работах был рассмотрен ряд задач моделирования как отдельных ячеек, так и сетей стандарта IEEE 802.11 в целом. Были проанализированы, в частности, вопросы построения гетерогенных сетей,

вопросы обеспечения качества обслуживания в БЛВС, рассмотрена работа сетей с позиции теории массового обслуживания.

Вопросам же разработки расчетных методов для решения задач проектирования БЛВС до настоящего времени не было уделено достаточно внимания. Точно также неисследованными до настоящего времени остались вопросы оптимизации режимов блочной (агрегированной) передачи кадров в ячейке БЛВС данного стандарта. На решение указанных задач и направлена диссертационная работа.

Объект и предмет исследования. *Объектом исследования* являются беспроводные локальные вычислительные сети стандарта IEEE 802.11. *Предметом исследования* являются модели и методы организации сетей стандарта IEEE 802.11.

Цель работы и задачи исследования. *Целью работы* является повышение эффективности планирования и функционирования сетей стандарта IEEE 802.11 за счет разработки моделей оценки пропускной способности и методов оптимизации использования канального ресурса, а также методов повышения эффективности функционирования сети стандарта IEEE 802.11n/ac.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие *задачи*:

- 1) анализ развития, современных тенденций и перспектив сетей IEEE 802.11; анализ современных архитектур сетей IEEE 802.11;
- 2) анализ некоторых инженерных аспектов построения сетей IEEE 802.11;
- 3) анализ помех в сетях IEEE 802.11;
- 4) анализ проблем проектирования сетей IEEE 802.11;
- 5) анализ подходов к моделированию БЛВС IEEE 802.11;
- 6) статистический анализ трафика и параметров сетей IEEE 802.11;
- 7) разработка модели канала IEEE 802.11ac;
- 8) разработка модели механизма A-MSDU;
- 9) оптимизация числа кадров в механизме A-MSDU;
- 10) разработка модели межканальных помех;
- 11) разработка модели деградации отношения сигнал/шум;
- 12) выбор расчетных сценариев работы и анализ результатов.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1. Разработана модель канала сети стандарта IEEE 802.11 отличающаяся от известных моделей тем, что в ней предлагается аппроксимация дискретной зависимости скорости передачи от отношения сигнал/шум непрерывной монотонной функцией;

2. Разработана модель, в отличие от известных моделей, позволяющая учесть влияние межканальных помех с учетом распределения узлов и их режимов работы;

3. Предложен метод расчета, использующий две оригинальные модели, позволяющие количественно учесть эффект влияния межканальных помех на пропускную способность канала стандарта IEEE 802.11;

4. Предложена модель, позволяющая количественно оценить эффективность использования канального ресурса в ячейке сети IEEE 802.11ac, и отличающаяся от известных моделей тем, что она учитывает, как размер кадра, так и вероятность битовой ошибки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования.

Доказана возможность описания зависимости скорости передачи в канале IEEE 802.11 от отношения сигнал/шум непрерывной монотонной функцией.

Установлена зависимость между характеристиками межканальных помех и значением отношения сигнал/шум в канале стандарта IEEE 802.11.

Расширен класс методов оценки пропускной способности каналов стандарта IEEE 802.11 за счет учета взаимных влияний как узлов планируемой сети между собой, так и между узлами сторонних сетей этого стандарта.

Решена задача поиска оптимального числа кадров в блоке A-MSDU.

Практическая значимость исследования.

Модель может быть использована в задачах анализа функционирования и планирования сетей стандарта IEEE 802.11, а также для решения задачи оптимизации.

Модель позволяет производить количественную оценку влияния межканальных помех на функционирование канала стандарта IEEE 802.11n/ac.

Применение данного метода позволяет решать задачи анализа и планирования сетей стандарта IEEE 802.11n/ac с количественным учетом влияния межканальных помех.

Разработанный метод позволяет управлять числом кадров в блоке A-MSDU для обеспечения повышения эффективности использования канального ресурса сети стандарта IEEE 802.11.

Методология и методы исследования. При получении основных результатов работы использовались общие методы теории вероятностей и математической статистики, математического анализа и методы математической оптимизации. Численная проверка полученных аналитических решений осуществлялась методами имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель канала стандарта IEEE 802.11n/ac для оценки эффективности функционирования сети.
2. Модель межканальных помех в сети стандарта IEEE 802.11n/ac.
3. Метод оценки пропускной способности канала стандарта IEEE 802.11n/ac с учетом межканальных помех.
4. Модель блочной передачи кадров в механизме A-MSDU стандарта IEEE 802.11ac и метод расчета оптимального числа кадров в блоке, который позволяет улучшить эффективность использования канального ресурса сети.

Степень достоверности и апробация результатов. *Степень достоверности* полученных результатов диссертационной работы подтверждается корректным применением математических методов исследования, а также согласованностью аналитических результатов с результатами имитационного моделирования.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: 73-й и 74-й научно-технических конференциях посвященных Дню радио (Санкт-Петербург, 2017, 2018), IV Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2017), The 17th/18th International Conference NEW2AN/ruSMART (2017, 2018), 20th International Conference Distributed Computer and Communication Networks (DCCN) (2017), 2-й и 3-й международных конференциях «Интернет вещей и 5G» (Санкт-Петербург, 2016, 2017), 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) (2018), а также на заседаниях кафедры «Сети связи и передача данных» СПбГУТ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 научные работы, из них: 4 в рецензируемых научных изданиях, 4 в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 14 в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 3, 4, 12, 14.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Направления исследований диссертационной работы, формулировки проблем и постановки задач обсуждались с научным руководителем А.И. Пармоновым, что отражено в совместных публикациях, в которых основные результаты и их доказательства принадлежат автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает содержание, введение, 5 глав, заключение, список сокращений, список литературы из 198

наименований и одного приложения. Общий объем работы – 174 страниц, из них основного текста – 138 страниц, включая 43 рисунка и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор современного состояния сетей этого стандарта, проведен анализ состава сетей БЛВС, их основных архитектур, областей применения и ближайших перспектив развития.

К настоящему времени БЛВС стандарта IEEE 802.11 уже получили широчайшее распространение, однако интерес к ним не только не снижается, но и продолжает расти. Так, число устройств в мире, поддерживающих данный стандарт, выросло с 4 миллиардов в 2014 году до 9,5 миллиардов в 2018. Согласно прогнозу, ранее сделанному компанией Cisco Systems, в пятилетний период с 2016 по 2021 годы ожидается поставка производителям устройств около 20 миллиардов наборов микросхем с поддержкой данного стандарта, причем 95% из них будет поддерживать работу в частотном диапазоне 5 ГГц. Одновременно с этим развитие современных средств мобильной связи в настоящий момент привело к массовому развертыванию сетей четвертого поколения (4G) в различных странах мира, включая РФ. В результате этого нередкой является ситуация, при которой в одной и той же зоне нахождения пользователей обеспечивается покрытие сетями различных технологий, т.е. имеет место взаимное перекрытие зон обслуживания. Типовым примером может быть сосуществование сетей IEEE 802.11 и LTE. Таким образом БЛВС стандарта IEEE 802.11 стали составной частью гетерогенной сети связи. Этому способствует рост числа пользовательских устройств, поддерживающих эти стандарты, при устойчивом увеличении требований к пропускной способности. Все это ведет к заметному повышению сложности планирования современных сетей стандарта IEEE 802.11.

В рамках анализа сделан обзор основных этапов развития с точки зрения различных методов повышения скорости передачи и применяемых методов повышения эффективности работы. Показано, что современные БЛВС как корпоративного, так и операторского назначения должны обладать широким

функционалом по обеспечению возможностей управления радиоресурсами, безопасности, мониторинга, анализа работы и проч. Продемонстрированы основные тенденции развития БЛВС с точки зрения ближайшего ожидаемого отраслью дополнения стандарта IEEE 802.11ax. Показано место технологии стандарта IEEE 802.11 в разрезе модели взаимодействия открытых систем (ВОС). Проведен анализ современных архитектур построения сетей IEEE 802.11. Отмечены основные виды услуг, предоставляемые с помощью сетей этого стандарта.

Во второй главе рассматриваются основные проблемы, возникающие в процессе проектирования БЛВС стандарта IEEE 802.11. Проводится анализ различных видов помех и их влияния на работу целевой сети.

В данной главе проведен анализ жизненного цикла проектирования и развертывания БЛВС стандарта IEEE 802.11. Рассмотрены основные критерии радиопланирования и применяемые подходы. Проанализированы основные практические проблемы проектирования БЛВС.

Разобраны и проанализированы различные радиочастотные помехи, влияющие на работу беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11. Анализ публикаций по данной тематике показал, что наибольшее влияние на работу сети оказывают внутриканальные и межканальные помехи, создаваемые точками доступа и клиентскими устройствами. Выполнен обзор механизмов, обеспечивающих возможность работы сетей стандарта IEEE 802.11 в условиях помех. Рассмотрены методы, предусмотренные стандартом, обеспечивающие минимизацию коллизий в условиях взаимных влияний между устройствами. Показано, что в современных БЛВС, и в особенности в случае высокой плотности абонентских устройств и ТД, существенное влияние на работу сети оказывают межканальные помехи.

Отмечена важность учета полной формы спектральной маски сигнала при оценке его помехообразующего влияния. Отмечено, что степень влияния как внутриканальных, так и межканальных помех на работу сети существенно зависит от трафика (использования) соответствующих каналов.

Результаты анализа основных видов помех и методов, обеспечивающих функционирование сети в условиях помех, показали, что для обеспечения эффективности планирования сети высокой плотности, наряду с частотно-территориальным планированием, необходимо учитывать, как межканальные помехи, так и природу трафика. Приведена общая схема исследования, показана взаимосвязь разработанных моделей и результатов их анализа.

В третьей главе был рассмотрен радиоканал с позиции его занятости во времени, т.е. временного ресурса. Предложена непрерывная функция, позволяющая описать зависимость параметра канала (число бит на символ) от

характеристики среды (ОСШ). В дальнейшем этот результат используется в задаче анализа модели межканальных помех.

Выберем целью построения модели оценку длительности передачи кадра с данными как функцию от текущих условий работы и параметров передаваемого трафика.

Допустим, что антенны точки доступа (ТД) и клиентского устройства обладают круговой диаграммой направленности; основная ТД всегда доступна для клиента с уровнем приема сигнала равным -60 дБм и выше; работа идет в каналах NT20/VHT20; режимы множественного ввода-вывода не используются.

С точки зрения использования временного ресурса канала передачи, величиной, характеризующей схему модуляции и кодирования (MCS), является число бит полезных данных в расчете на один символ – N_{DBPS} . Отметим, что значение N_{DBPS} имеет ту же форму зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ), что и от скорости передачи ($PHYRate$) на соответствующей MCS и в предлагаемой модели зависит только от ОСШ.

Таким образом, дискретная функция $N_{DBPS}(SNR)$ для рассматриваемого случая имеет вид:

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} N_{DBPS_i}, & SNR_{MIN_i} < SNR < SNR_{MAX_i}, \end{cases} \quad (1)$$

где i – номер индекса MCS, а SNR_{MIN_i} и SNR_{MAX_i} – соответственно минимальный и максимальный рекомендуемый уровень ОСШ для соответствующего индекса MCS. Далее аппроксимируем функцию (1) непрерывной, монотонной, неразрывной, всюду дифференцируемой (гладкой) функцией. Для решения данной задачи удобно выбрать S-образную функцию, удовлетворяющую таким требованиям. Среди таких функций наиболее хорошие результаты дает аппроксимация гауссоидой:

$$N_{DBPS}(SNR) = \begin{cases} 0 & SNR < 2 \\ N_{DBPS_MAX} \left(1 - \exp\left(-\frac{SNR^2}{2a^2}\right) \right) & SNR \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

Ступенчатая функция (1) аппроксимирована (2) гауссоидой, которая отражает тенденцию изменения числа бит полезной информации передаваемых в одном символе при изменении ОСШ. При этом: $N_{DBPS_MAX} = 312$, максимально возможное значение N_{DBPS} , бит; a – полуширина кривой.

На рисунке 1 приведены зависимости (1) и (2) для дополнения стандарта IEEE 802.11ac при работе в частотном канале NT20/VHT20 и коротким защитным интервалом равным 0,4 мкс.

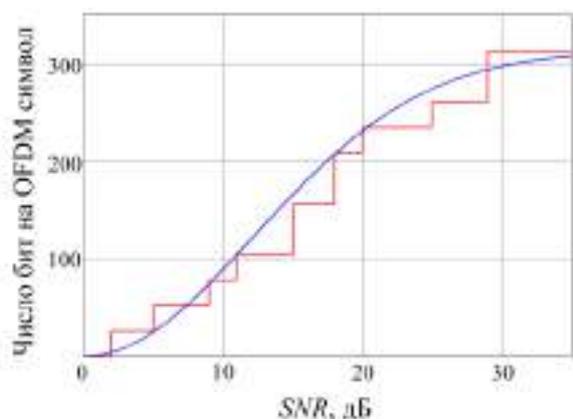


Рисунок 1 – Зависимость $N_{DBPS}(SNR)$ с аппроксимацией

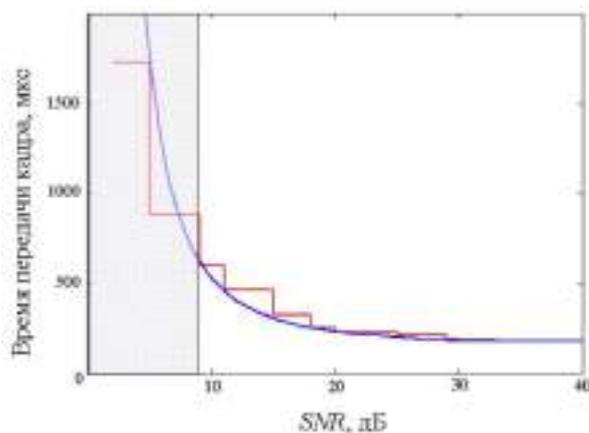


Рисунок 2 – Зависимость $T_{DATA}(SNR)$ с аппроксимацией

Наилучшая аппроксимация ступенчатой функции (1) достигается при значении параметра гауссоиды, $a = 12,18$. На рисунке 2 построена зависимость времени передачи кадра $T_{DATA}(SNR)$ для кадра размером 1518 байт.

Формула (3) связывает длительность передачи кадра с его размером и значением ОСШ.

$$T_{DATA} = T_{PHY-PREAMBLES} + T_{SYML} \left[\frac{T_{SYMS} \cdot m_{STBC}}{T_{SYML}} \left[\frac{8L_{MSDU} + N_{Service}}{m_{STBC} N_{DBPS-MAX} \left(1 - e^{-\frac{SNR^2}{2a^2}}\right)} \right] \right] \quad (3)$$

Из рисунка 2 видно, что аппроксимация (2) применима при условии, что значение ОСШ составляет не менее 9 дБ. Что касается зоны особо низких значений ОСШ < 9 дБ (на рисунке – заштрихована), то здесь необходимо пользоваться исходным видом зависимости (1).

Предложенная модель, описывает канал связи с позиции длительности передачи кадра данных. Модель выражает зависимость длительности передачи кадра от величины сигнал/шум. При этом функция является монотонной, непрерывной и гладкой. Анализ предложенной модели показал достаточную для практических целей точность. Относительная ошибка во всем диапазоне длин кадров не превышает 7,7%, а в большинстве случаев не более 6,0%. Для трафика с размером кадра, принятого равным 700 байт, относительная ошибка не превышает 5,3%.

В четвертой главе рассмотрены методы блочной передачи кадров и предложена модель, связывающая вероятность потери блока кадров A-MSDU с битовой вероятностью ошибки в канале. Кроме того, предложен метод оптимизации модели агрегирования кадров. Предложенный метод позволяет

оценить число кадров, являющееся оптимальным для заданного вида трафика с позиции наибольшей эффективности использования канального ресурса.

Одной из основных целей нововведений в группе стандартов IEEE 802.11 является повышение скорости передачи данных и эффективности использования канального ресурса. Под эффективностью использования канала передачи данных будем понимать отношение фактически имевшей место скорости передачи полезных данных к битовой скорости передачи, т.е. с учетом модуляции и кодирования.

Основная цель механизма агрегирования A-MSDU состоит в объединении в рамках одной передачи нескольких кадров, адресованных одному клиенту, для формирования одного A-MSDU. Т.е. оптимизируются накладные расходы на заголовки канального уровня, которые в таком случае идентичны для большого числа кадров.

Примем следующие допущения: трафик UDP, вероятность битовой ошибки в канале постоянная, режим работы VHT, один пространственный поток, MIMO не используется, LDPC кодирование. Допустим, что повторные передачи блоков A-MSDU производятся без изменения режимов передачи (индексов MCS). Не будем учитывать заголовки A-MPDU, на решение задачи оценки эффективности агрегирования собственно режима A-MSDU это не влияет. Ввиду того, что вероятность пропуска ошибки передачи вышестоящим механизмом MAC-уровня (CRC-32) мала, а также поскольку на уровне MAC коррекция ошибки не осуществляется, не будем отдельно рассматривать случай пропуска ошибки в кодовом слове LDPC.

Целью выберем построение модели режима агрегирования A-MSDU в зависимости от условий работы канала передачи.

Определим эффективность использования радиоканала в идеальных условиях следующим образом:

$$ChUtil = \frac{THPT}{PHYRate} = \frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU}}{T_{A-MSDU} + T_{BO} + T_{DIFS}} \cdot \frac{1}{PHYRate}, \quad (4)$$

где $T_{A-MSDU} = T_{PHY-PREAMBLES} + T_{MAC} + K \cdot (T_{A-MSDU-Header} + T_{MSDU}) + T_{SIFS} + T_{ACK}$.

Обозначим как p_{BIT} – вероятность ошибочного приема одного бита и будем считать эту вероятность постоянной. Обозначим как N_{CW} число кодовых слов, необходимых для передачи одного кадра данных размером L_{MSDU} (байт).

Успешно принятым будет являться кодовое слово, где число битовых ошибок не превышает величину:

$$t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor, \quad (5)$$

где d – минимальное кодовое расстояние. Согласно теореме Бернулли, вероятность успешного приема кодового слова P_{CW} общим размером CW_{size} бит определяется как сумма вероятностей успешного приема кодовых слов с числом ошибочных бит k равным от 0 до t .

$$P_{CW} = (1 - p_{BIT})^{CW_{size}} + \sum_{k=1}^t \frac{\prod_{i=0}^{k-1} (CW_{size} - i)}{k!} \cdot p_{BIT}^k (1 - p_{BIT})^{CW_{size} - k}. \quad (6)$$

Формула (8) дает вероятность успешного приема кодового слова в зависимости от его размера, скорости кодирования, определяющей параметр t , и вероятности битовой ошибки. На рисунке 3 приведена зависимость вероятности успешного приема кодового слова от вероятности битовой ошибки для MCS5 и $L_{MSDU} = 700$ байт.

Поскольку для потери кадра достаточно потери хотя бы одного кодового слова из их общего числа N_{CW} , то вероятность p_{MSDU} потери кадра MSDU:

$$p_{MSDU} = 1 - P_{CW}^{N_{CW}}. \quad (7)$$

Тогда вероятность p_{A_MSDU} потери блока кадров A-MSDU:

$$p_{A_MSDU} = 1 - (1 - (1 - P_{CW}^{N_{CW}}))^K = 1 - P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}. \quad (8)$$

Вероятность, что n -я последовательная передача блока A-MSDU будет успешной, равна:

$$(1 - p_{A_MSDU}) \cdot P_{A_MSDU}^{n-1}. \quad (9)$$

В итоге предполагаемое число попыток передачи A-MSDU, N_{retr} осуществленных прежде, чем будет иметь место успешная передача A-MSDU, составляет:

$$N_{retr} = \sum_{i=1}^{\infty} ((1 - p_{A_MSDU}) \cdot P_{A_MSDU}^{i-1} \cdot i) = \frac{1}{1 - p_{A_MSDU}} = \frac{1}{P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}. \quad (10)$$

Тогда эффективность использования канала:

$$ChUtil = \frac{THPT}{PHYRate} \cdot \frac{1}{N_{retr}} = \frac{K \cdot 8 \cdot L_{MSDU} \cdot P_{CW}^{N_{CW} \cdot K}}{T_{A_MSDU} + T_{BO} + T_{DIFS}} \cdot \frac{1}{PHYRate}. \quad (11)$$

Теперь получим аналитическое выражение для оптимального числа K_{opt} , при котором достигается максимальное значение эффективности использования канала. Это значение соответствует

$$K_{opt} = \arg \max_K (ChUtil(K)), \text{ при условиях } K \in N, K \leq K_{MAX}. \quad (12)$$

При этом K_{MAX} – наибольшее число кадров в блоке в заданном режиме работы.

Для нахождения значения K_{opt} , рассмотрим промежутки монотонности функции (11). Она имеет выраженный экстремум (максимум) на положительной полуоси K , который определяется следующим образом:

$$K_{opt} = \arg \left\{ \frac{d(ChUtil)}{d(K)} = 0 \right\}, \text{ при } K > 0. \quad (13)$$

Решая (13), получаем выражение для оптимального K :

$$K_{opt} = -\frac{T_2}{2T_1} - \frac{\sqrt{(T_2 N_{CW} \ln p_{CW})^2 - 4T_2 T_1 N_{CW} \ln p_{CW}}}{2T_1 N_{CW} \ln p_{CW}}. \quad (14)$$

где $T_1 = T_{A-MSDU-Header} + T_{MSDU}$ и

$$T_2 = T_{MAC} + T_{SIFS} + T_{ACK} + T_{BO} + T_{DIFS} + T_{PHY-PREAMBLES}.$$

Формула (14) дает аналитическое выражение для оптимального числа кадров при агрегировании А-MSDU в заданных условиях работы. Покажем для примера оптимальное число кадров MSDU, для агрегирования в режиме А-MSDU при следующих условиях: MCS = 8, $L_{MSDU} = 700$ байт. График приведен на рисунке 4.

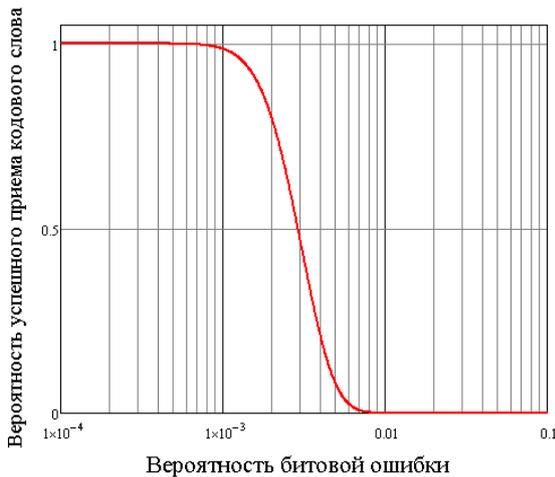


Рисунок 3 – Зависимость $P_{CW}(p_{BIT})$

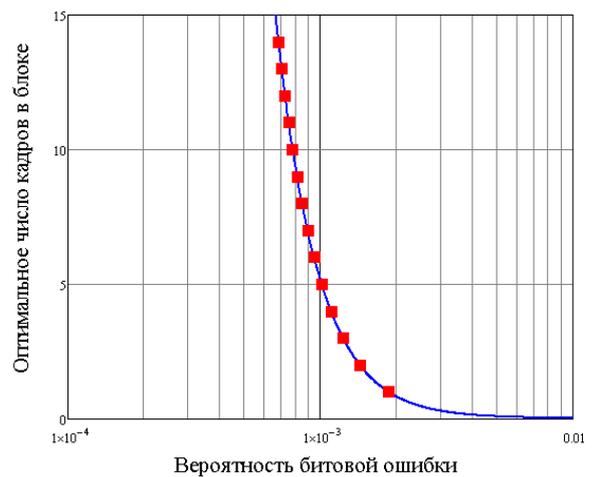


Рисунок 4 – Зависимость $K_{opt}(p_{BIT})$ для MCS8

Таким образом, показано, что существует возможность управления эффективностью канала стандарта IEEE 802.11ac, для реализации которой необходима разработка соответствующей модели и метода.

Разработана модель канала стандарта IEEE 802.11ac, позволяющая оценить эффективность его использования на основе данных о вероятности битовой ошибки. Предложенная модель учитывает размер кадров (т.е. тип трафика), вероятность битовой ошибки и механизм кодирования физического уровня для данного дополнения стандарта.

Доказано, что управление количеством кадров в блоке A-MSDU дает возможность влиять на эффективность использования канала стандартом IEEE 802.11ac. Без учёта вероятности битовых ошибок, повышение количества передаваемых кадров увеличивает эффективность использования канала. Однако в реальных условиях при ненулевой вероятности битовой ошибки возрастают накладные расходы, связанные с повторными передачами кадров, принятых с ошибками, что приводит к задаче поиска оптимального количества кадров.

Разработан метод выбора оптимального числа кадров в блоке A-MSDU, использование которого позволяет повысить эффективность использования канала стандарта IEEE 802.11ac.

В пятой главе рассматриваются взаимодействия принимаемых сигналов ячеек сети данного стандарта в рабочей области спектра и предлагается модель межканальных помех, предполагающая полный учет формы спектральной маски всех сигналов, создающих помеху. Далее рассматривается модель зависимости изменения величины битовой скорости передачи данных согласно индексу MCS от изменения значения отношения сигнал/шум в соответствии с предложенной моделью канала. В заключительной части пятой главы предлагается ряд расчетных сценариев, являющихся типовыми для инженерной практики. Для них выполнены расчеты в соответствии с предложенными моделями и сделаны выводы об их применимости.

Допустим, что горизонтальные (азимутальные) проекции диаграмм направленности всех источников сигнала говорят об изотропности излучения, а коэффициенты усиления антенн всех устройств равны между собой. Будем также считать, что на приемнике не превышен пороговый уровень приема, определяемый в стандарте. Допустим, что зона покрытия является плоской. Допустим также, что эффекты межканальных помех, порождаемых целевой и посторонними БЛВС, на целевую ячейку, одинаковы и определяются только параметрами модели. Допустим, что приемник обладает идеальной избирательностью, а его АЧХ имеет прямоугольную форму. Будем считать, что в среде имеют место лишь помехи от сетей IEEE 802.11. Примем, что клиентский состав рассматриваемых ячеек однороден, т.е. все клиенты обладают одинаковой функциональностью. Примем, что частотное планирование БЛВС выполнено идеально и внутриканальные помехи отсутствуют. Будем считать, что уровень

приема целевого сигнала стабилен и составляет -60 дБм, а шумовой порог в заданных условиях работы равен -90 дБм. В модели не будем учитывать замирания сигнала, влияющие на характер случайной величины затухания. В данном анализе будем учитывать лишь взаимное расположение источников помехообразующих сигналов и приемника целевого сигнала. Распределение источников по территории будем считать равномерным.

Определим как $S_T(f)$ распределение уровня мощности полезного сигнала на спектре, а $SI_n(f)$ – как распределение уровня мощности сигнала, создающего помеху.

$$SI_n(f) = P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L), \text{ (дБм)} \quad (15)$$

$$S_T(f) = P_T + S(f - F_T), \text{ (дБм)} \quad (16)$$

где P_n (дБм) – измеренный уровень сигнала для n -го сигнала, создающего помеху; P_T (дБм) – измеренный уровень целевого сигнала; P_{rad} – уровень излучения (дБм) источника сигнала, создающего помеху; $M(L)$ – среднее затухание (дБ) помехообразующего сигнала; $S(f)$ – спектральная маска канала.

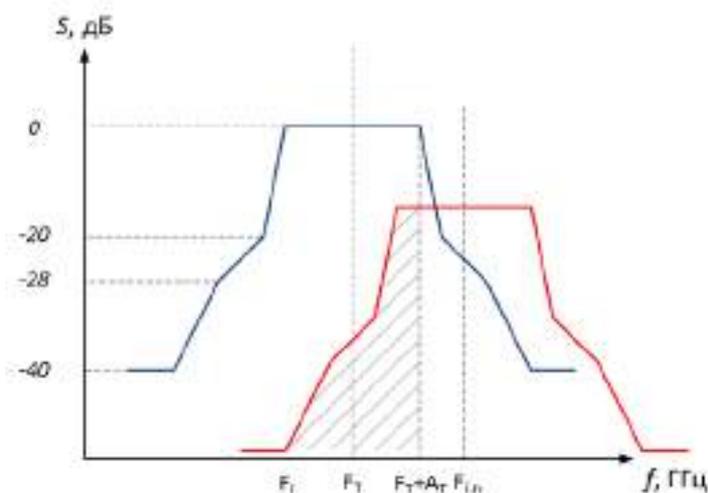


Рисунок 5 – Модель межканальной помехи в спектре.

Опишем затухание сигнала моделью, рекомендованной для применения внутри помещений (ITU-R 1238-9):

$$L(d) = 20 \lg(f) + N \lg(d) + L_f(m) - 28, \text{ (дБ)} \quad (17)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м); f – частота (МГц); N – дистанционный коэффициент потерь мощности; m – количество препятствий; $L_f(m)$ – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через препятствие (дБ). В рассматриваемом случае $L_f(m) = 0$.

Таким образом, уровень приема помехообразующего сигнала на его центральной частоте определяется как:

$$P_n = P_{rad} - \left(20 \lg(F_{i,n}) + N \lg(d) + L_f(m) - 28 \right), \text{ (дБм)} \quad (18)$$

Полагаем, что равномерное распределение источников помех задано на круге, площадь которого равна S , радиус R , на интервале $0 \leq r \leq R$. Радиус зоны R определяется как $R = \arg\{P_{rad} - L_{MAX} = -82 \text{ дБм}\}$ (м), где L_{MAX} – максимальное затухание сигнала до уровня предельной чувствительности приемника -82 дБм, определяемой стандартом, т.е. $L_{MAX} = L(R)$.

Функция плотности вероятности для равномерного распределения на круге является константой:

$$f(x, y) = \frac{1}{S} = \frac{1}{\pi R^2}. \quad (19)$$

Обозначим $-20 \lg(F_{i,n}) - L_f(m) + 28 = G$ и после преобразований получим:

$$r = 10^{\frac{G+L(r)}{N}}. \quad (20)$$

Функция распределения затухания сигнала L на круге R :

$$F(L) = \iint_{D_L} f(x, y) dx dy = \int_0^{2\pi} \int_{10^{\frac{G+L(r)}{N}}}^R \frac{1}{S} r dr d\theta = 1 - \frac{1}{R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}}, \quad (21)$$

где D_L – область определения L .

Функция плотности вероятности:

$$f(L) = \frac{dF(L)}{dL} = \frac{2 \ln 10}{N \cdot R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}}. \quad (22)$$

Значению L_{MAX} соответствует минимальный уровень приема с точки зрения чувствительности принимающей стороны. В стандарте он принимается за -82 дБм. Если $P_{rad} = 14$ дБм, то $L_{MAX} = 14 - (-82) = 96$ дБ.

Математическое ожидание затухания $M(L)$ помехообразующего сигнала в зоне связи (на круге R), будет определяться как:

$$M(L) = \int_{L_{MIN}}^{L_{MAX}} L \cdot f(L) dL = \int_{L_{MIN}}^{L_{MAX}} L \cdot \frac{2 \ln 10}{N \cdot R^2} \cdot 10^{\frac{2G}{N}} \cdot 10^{\frac{2L(r)}{N}} \cdot dL, \text{ (дБ)}. \quad (23)$$

Поскольку $f(L_{\min}) \approx f(0)$ удобно принять $L_{MIN} = 0$, что даст возможность упростить выражение. Тогда после упрощений:

$$M(L) \approx L_{MAX} - \frac{N}{2 \ln 10}, \text{ (дБ)} \quad (24)$$

Поскольку $L_{MAX} = 96$ дБ, то:

$$R = 10^{\frac{124 - 20 \lg(F_{i,n})}{N}}, \text{ (м)} \quad (25)$$

Так, для частоты 5,2 ГГц, $R \approx 40$ м. Выразим спектры мощности в мВт. Тогда формулы (15) и (16) примут вид:

$$SIW_n(f) = 10^{\frac{P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L)}{10}}, \text{ (мВт)} \quad (26)$$

$$Sw_T(f) = 10^{\frac{P_T + S(f - F_T)}{10}}, \text{ (мВт)} \quad (27)$$

Обозначим как n – номер канала, при их общем числе равном k , а за m_n – число ТД канала n , чей сигнал доступен для приема. За $F_{i,n}$ обозначим частоту канала с номером n . Обозначим как Q – вероятность занятости канального ресурса и будем считать её одинаковой для всех ТД, создающих помехи.

Общая спектральная маска всех помех будет равна:

$$SIW(f) = NF + Qm_n \sum_{n=1}^k 10^{\frac{P_{rad} + S(f - F_{i,n}) - M(L)}{10}}, \text{ (мВт)} \quad (28)$$

где NF – шумовой порог, мВт. Определим отношение сигнал/шум для целевого канала как отношение площадей спектральных масок. Тогда ухудшение ОСШ, вызванное межканальными помехами составляет:

$$\Delta SNR = 10 \lg \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{NF \cdot 2A_T} - 10 \lg \frac{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} Sw_T(f) df}{\int_{F_T - A_T}^{F_T + A_T} SIW(f) df}, \text{ (дБ)} \quad (29)$$

Полученная величина ΔSNR представляет собой модельное значение, на которое уменьшится ОСШ для целевого сигнала, т.е. позволит оценивать уменьшение пропускной способности канала в связи с необходимостью для ТД работать в режимах, соответствующих меньшим индексам MCS. Поскольку функция (2) является монотонно возрастающей, то значение $\Delta PHYRate$, соответствующее величине ΔSNR , будет определяться как:

$$\Delta PHYRate = \frac{N_{DBPS_MAX}}{T_{SYM}} \left(\exp \left(-\frac{(SNR_0 - \Delta SNR)^2}{2a^2} \right) - \exp \left(-\frac{SNR_0^2}{2a^2} \right) \right). \quad (30)$$

где SNR_0 – ОСШ в отсутствие межканальных помех. Теперь оценим работу сетей IEEE 802.11 в различных сценариях их работы. Их параметры и результаты расчетов приведены в таблице 1.

Среди рассматриваемых условий мы будем учитывать: дополнение стандарта; частотный план (числа через запятую обозначают номера частотных каналов); помехи от посторонних сетей (т.е. имеются или нет в радиусе действия ячейки других сетей, создающие для целевой ячейки эффекты межканальной помехи); тип канала-помехи.

Отметим, что предлагаемый подход позволяет реализовать оценку для самых различных сценариев работы БЛВС, не ограничиваясь предлагаемыми.

Таблица 1 – Результаты расчетов

№	Номер и тип целевого канала	Частотный план	Смежные сети	Тип канала-помехи	m_n	Q	ΔSNR , дБ	$\Delta PHYRate$, Мбит/с
1	6, HT20	1,6,11	Нет	HT20	2	0,3	0,11	0,08
2	6, HT20	1,6,11	Да	HT20	2	0,3	13,98	26,94
3	6, HT20	1,6,11	Да	HT40	1	0,3	17,93	40,75
4	5, HT20	1,5,9,13	Нет	HT20	2	0,3	0,35	0,25
5	4, HT20	1,4,8,11	Нет	HT20	2	0,3	6,33	7,45
6	44, VHT20	UNII 1-2	Да	VHT20	1	0,3	0,21	0,18
7	44, VHT20	UNII 1-2	Да	VHT80	1	0,3	12,75	27,63

Отметим практическое отсутствие ухудшения ОСШ для частотных планов в типовых внедрениях БЛВС (сценарии 1 и 4). Видно, что частотный план в диапазоне 2,4 ГГц с выбором каналов 1, 4, 8, 11 (сценарий 5) является нежелательным, поскольку по сравнению со сценариями 1 и 4 дает заметное снижение (на 7,4 Мбит/с) снижение средней скорости передачи. В то же время частотный план 4 с номерами каналов 1, 5, 9, 13 для диапазона 2,4 ГГц, является приемлемым при условии корректной поддержки абонентскими устройствами работы в канале №13. Для работы в диапазоне 5 ГГц, видно практическое отсутствие негативного влияния посторонних сетей, поскольку при работе в этом диапазоне, центральные частоты каналов имеют шаг равный 20 МГц (4 номера каналов), что частично исключает характерную для диапазона 2,4 ГГц ситуацию, когда нередко имеют место смежные сети с произвольным выбором каналов.

В заключении отмечено, что в диссертации разработан модельно-методический аппарат, обеспечивающий повышение эффективности сетей беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, заключаются в следующем:

Рассмотрены основные критерии радиопланирования и применяемые подходы. Проанализированы основные проблемы проектирования БЛВС.

Предложена модель, описывающая канал связи с позиции длительности передачи кадра данных. Модель выражает зависимость длительности передачи кадра от величины сигнал/шум. При этом функция является монотонной, непрерывной и гладкой.

Анализ предложенной модели показал достаточную для практических целей точность. Относительная ошибка во всем диапазоне длин кадров не превышает 7,7%, а в большинстве случаев не более 6,0%. Для трафика с размером кадра, принятого равным 700 байт, относительная ошибка не превышает 5,3%.

Разработана модель канала стандарта IEEE 802.11ac, позволяющая оценить эффективность его использования на основе данных о вероятности битовой ошибки. Предложенная модель учитывает размер кадров (т.е. тип трафика), вероятность битовой ошибки и механизм кодирования физического уровня для данного дополнения стандарта.

Разработан метод выбора оптимального числа кадров в блоке A-MSDU, использование которого позволяет повысить эффективность использования канала дополнения стандарта IEEE 802.11ac.

Получена аналитическая модель, позволяющая оценить среднее затухание сигналов, создающих помехи на целевой площади радиопокрытия при равномерном распределении источников.

Предложен подход, позволяющий оценивать эффекты межканальных помех с учетом полной формы спектральной маски, как целевого сигнала, так и помехообразующих сигналов смежных сетей.

Предложен метод оценки ухудшения отношения сигнал/шум в условиях межканальных помех для современных сетей IEEE 802.11. Разработана модель для количественной оценки влияния межканальных помех на битовую скорость передачи.

Предложен метод расчета и получены количественные оценки работы сети IEEE 802.11n/ac в различных режимах, встречающихся в инженерной практике.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Викулов, А.С. Модель канала OFDM в задаче оценки эффективности сети IEEE 802.11 / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Инфокоммуникационные технологии. – 2018. – Том 16. – № 3. – С. 290-297.
2. Викулов, А.С. Эффективность использования канала и метод оптимизации числа кадров в блоке А-MSDU для сети IEEE 802.11ac / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2018. – № 4. – С. 21-31.
3. Викулов, А.С. Модель межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 в задаче оценки пропускной способности / А.С. Викулов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2019. – № 1. – С. 36-45.
4. Викулов, А.С. Исследование модели межканальной интерференции в сетях IEEE 802.11 для оценки пропускной способности / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Труды учебных заведений связи. – 2019. – №2 – С. 43-48.

Публикации в изданиях, входящих в Scopus и Web of Science

5. Vikulov, A. Practical Results of WLAN Traffic Analysis. / A. Paramonov, A. Vikulov, S. Scherbakov // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10531. – P. 721-733.
6. Vikulov, A. The augmented reality service provision in D2D network / M. Makolkina, A. Vikulov, A. Paramonov // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 700. – PP. 281-290.
7. Vikulov, A. A-MSDU Frame Aggregation Mechanism Efficiency For IEEE 802.11ac Network. The Optimal Number Of Frames In A-MSDU Block / A. Vikulov, A. Paramonov // 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN), and 11th Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART) conference proceedings. – 2018. – pp. 328-339. – doi:10.1007/978-3-030-01168-0_31
8. Vikulov, A. The Airtime Resource Model Of The OFDM Channel In The Task Of The IEEE 802.11 Network Efficiency Estimation / A. Vikulov, A. Paramonov // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) – 2018. – DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631235

Публикации в других изданиях и материалах конференций

9. Викулов, А.С. Проблемы оценки производительности WI-FI высокой плотности / А.С. Викулов // Сборник трудов VII-ой Международной конференции "ИТ-Стандарт 2016", 6-7 декабря 2016 г., Москва, Московский технологический университет (МИРЭА), "TCDprint", С. 235-241.

10. Викулов, А.С. Стандарт IEEE 802.11ax и перспективы его применения для интернета вещей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Сб. науч. тр. II межд. конф. «Интернет вещей и 5G 2016», 7 декабря 2016. – 2016. – С. 38-41.

11. Викулов, А.С. Исследование длительностей пользовательских сессий в сети беспроводного доступа / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // 72-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. 2017. Сб. науч. тр. – 2017. – С. 196-197.

12. Викулов, А.С. Исследование клиентского состава в сети беспроводного доступа / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. VI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сб. науч. ст. в 4 т. – СПб. – 2017. – Т. 2. – С. 136-139.

13. Викулов, А.С. Анализ трафика в сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3. – №3. – С. 21-27.

14. Викулов, А.С. Исследование нагрузки в сети стандарта IEEE 802.11 / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 1-7.

15. Викулов, А.С. Анализ эффективности использования канала сети беспроводного доступа стандарта IEEE 802.11 по результатам наблюдений / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Сб. науч. тр. III-ой межд. конф. «Интернет вещей и 5G 2017» Под. ред. А. Е. Кучерявого. Санкт-Петербург, 20 декабря 2017. – 2017. – С. 68-73.

16. Викулов, А.С. Анализ методик тестирования БЛВС стандарта IEEE 802.11 / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // 73-я научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. 2018. Сб. науч. тр. – 2018. – С. 203-205.

17. Викулов, А.С. Введение в сети Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С.12-20.

18. Викулов, А.С. Анализ основных видов помех в задаче планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 21-31.

19. Викулов, А.С. Анализ особенностей масштабирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 32-42.

20. Викулов, А.С. Частотно-территориальное планирование сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 35-48.

21. Викулов, А.С. Функциональные особенности сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 2. – С. 49-61.

22. Викулов, А.С. Анализ подходов к организации радиопокрытия в сетях Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 3. – С. 38-51.

Подписано в печать 11.12.2019. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1