

Фролов Алексей Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
СИСТЕМ РАДИОДОСТУПА НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА**

Специальность

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

- Научный руководитель:** **Терешонок Максим Валерьевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий НИЛ-4802 МТУСИ.
- Научный консультант:** **Сперанский Валентин Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехнические системы» МТУСИ.
- Официальные оппоненты:** **Ефремова Елена Валериевна** – доктор физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН» (ФГБУН ИРЭ РАН), ведущий научный сотрудник
Цым Александр Юрьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт связи» (ФГУП ЦНИИС), начальник научно-исследовательского отдела
- Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР), г. Москва.

Защита диссертации состоится «3» декабря 2020 года в 13 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, МТУСИ, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Frolov/dis-Frolov.pdf> МТУСИ
Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 219.001.04
доктор технических наук, доцент _____ М. В. Терешонок

Актуальность темы. Современные электронные абонентские устройства связи являются мультистандартными и обеспечивают высокую скорость передачи данных. В связи с возросшей мобильностью абонентов операторы связи больше внимания уделяют развитию систем радиодоступа и переходят к микро- и фемтосотовой организации сети, обеспечивающей клиент-ориентированное предоставление услуг связи и увеличение скорости передачи данных. За последние годы значительно увеличилось покрытие систем WiFi. В этих условиях возникает проблема перегрузки радиочастотного спектра (РЧС). Диапазоны частот 2 400 – 2 483,5 МГц, 5 150 – 5 350 МГц и 5 650 – 6 425 МГц оказываются занятыми и перегруженными.

Эффективным техническим решением проблемы дефицита РЧС может стать применение многочастотных сверхширокополосных (СШП) сигналов, значение отношения занимаемой полосы частот которых к центральной частоте сигнала лежит в пределах от 0,5 до 2.

Известны проекты стандартов СШП связи IEEE 802.15.3a и ETSI TS 102455 (ECMA-368), в которых применяется алгоритм передачи WiMedia UWB. Однако подкласс многочастотных СШП систем до конца не изучен, реальные многочастотные системы пока не реализованы, кроме опытных разработок.

Наиболее перспективными для радиодоступа и наименее исследованными являются многочастотные СШП системы двух типов: 1) с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов; 2) на основе дискретных частотных сложных сигналов. Многие работы посвящены исследованиям влияния узкополосных помех на импульсные и многочастотные СШП системы радиодоступа, однако исследование влияния широкополосных помех на эти системы практически не описано в литературе. В связи с вышеизложенным, тема исследования вопросов построения и применения СШП систем на основе совместного использования спектра, как с узкополосными, так и с широкополосными системами радиосвязи, является актуальной.

Степень разработанности темы.

Теория и основные принципы работы и построения импульсных и многочастотных СШП систем описаны в работах Аджемова С.С., Урядникова Ю.Ф., Иммореева И.Я., Сперанского В.С., Косичкиной Т.П., Husein Arslan и др. авторов. Также, в работах Зайцева А.В. описаны принципы проектирования антенной СШП техники и организации работы многопользовательской самоорганизующейся сети радиосвязи. Наиболее изученными и проработанными из СШП систем являются импульсные системы СШП радиодоступа, менее изучены и менее описаны в литературе многочастотные СШП системы радиодоступа.

Исследование влияния узкополосных систем радиосвязи на рассматриваемые СШП системы и методы борьбы с узкополосными помехами представлено в работах Сперанского В.С., Косичкиной Т.П., Иммореева И. Я., Судакова А., Зайцева А.В., Радзиевского В.Г., Будко П.А. и др.

В работе А. Khalil показана эффективность применения кодирования для увеличения абонентов многочастотной СШП системы. Совместное использование РЧС в этой работе рассматривается как распределение радиочастотного ресурса между абонентами одной системы, а не как совместное использование РЧС различными системами радиодоступа.

В работе W. M. Jang отражены результаты исследований совместного использования спектра многочастотной системой радиодоступа с OFDM и когнитивной узкополосной ППРЧ

системой радиодоступа. В результате исследования выявлено свойство ортогональности сигналов, даны рекомендации по выбору сетки частот для системы с ППРЧ, при которой минимизируется взаимное влияние систем друг на друга. Однако в данной работе не отражены характеристики рассматриваемых систем, не учитывается при расчете и моделировании коэффициент широкополосности систем радиодоступа и метод формирования сигнала с ППРЧ. По материалам этой статьи можно сделать вывод о том, что мощность рассматриваемых систем неодинакова: мощность многочастотной системы с OFDM превышает мощность сигнала когнитивной системы с ППРЧ. В этой статье не приведена зависимость вероятности битовой ошибки от мощности помехи.

В работе S.P. Singh рассматривается проблема совместного использования спектра широкополосными и узкополосными системами радиодоступа в нелицензируемой части РЧС (2,4 ГГц). Было исследовано установление временной синхронизации многочастотной СШП системы с OFDM в условиях действия узкополосной помехи.

Однако, в данных работах не рассматриваются вопросы влияния широкополосных помех и условия совместного использования РЧС широкополосными системами радиодоступа и перспективными многочастотными СШП системами, которые рассмотрены в настоящей диссертации.

Анализ работ по теме совместного использования радиочастотного спектра современными системами связи с СШП системами радиодоступа показал, что данная проблема рассматривается только как совместная работа современных узкополосных систем радиодоступа с импульсными и некоторыми многочастотными СШП системами радиодоступа. Однако, практически не рассматривается совместное использование РЧС сверхширокополосных систем с современными широкополосными системами радиодоступа, работающими в настоящее время на сети общего пользования, спектральная плотность мощности которых превышает спектральную плотность мощности сигналов рассматриваемых СШП систем.

Таким образом, проблема совместного использования радиочастотного спектра современных широкополосных систем радиодоступа представляет интерес для исследования одновременной (совместной) работы в одном диапазоне частот современных широкополосных систем радиодоступа с многочастотными СШП системами радиодоступа, рассматриваемыми в настоящей диссертационной работе.

Цель работы и задачи исследования.

Цель: Разработка научно-технических решений, обеспечивающих повышение эффективности использования РЧС в корпоративных сетях за счет совместного использования РЧС многочастотными СШП системами и другими системами радиодоступа.

Предмет исследования – возможность совместного использования РЧС в диапазоне частот 2,85 - 10,6 ГГц современными системами WiFi и многочастотными СШП системами радиодоступа:

- с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов;
- на основе дискретных частотных сложных сигналов.

Объект исследования – многочастотные СШП системы радиодоступа

Научная задача исследования состоит в исследовании взаимного влияния многочастотных СШП систем радиодоступа с другими системами радиодоступа.

Частные научные задачи исследования:

1. Анализ возможностей многочастотных СШП систем радиодоступа с точки зрения их пригодности для совместного использования РЧС с другими системами радиодоступа;
2. Разработка усовершенствованной структуры многочастотных СШП систем:
 - а) с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов;
 - б) на основе дискретных частотных сложных сигналов,как наиболее перспективных для совместного использования РЧС с другими системами радиодоступа;
3. Разработка имитационных компьютерных моделей рассмотренных в работе многочастотных СШП систем, позволяющих количественно оценить возможность совместного использования РЧС с другими современными системами радиодоступа;
4. Проведение компьютерного эксперимента на реальном сигнале с целью исследования влияния сигналов современных систем радиодоступа на характеристики многочастотных СШП систем с дискретными частотными сигналами и с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, функционирующими совместно в одной полосе частот в условиях многолучевого канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

Методы исследования. Основная часть диссертации выполнена с привлечением методов статистической теории связи (статистического анализа и синтеза радиотехнических устройств и систем), спектрального анализа, имитационного моделирования.

Проведение полунатурного компьютерного эксперимента на разработанных имитационных компьютерных моделях исследуемых систем осуществлялось в системе математического проектирования MATLAB, а также при помощи специализированного программного обеспечения 89601BE VSA векторного анализа сигналов Agilent Technologies.

Обоснованность основных научных положений и результатов исследований, рекомендаций и выводов, сделанных в диссертационной работе, подтверждается проведенными экспериментами и статистическим математическим моделированием.

Научная новизна работы.

1. Разработаны имитационные модели предложенных в работе многочастотных СШП систем, которые, в отличие от известных, учитывают мощные узкополосные и широкополосные помехи, создаваемые современными системами радиодоступа диапазона 5 – 6 ГГц.
2. Получены характеристики помехоустойчивости СШП систем при наличии помехи, представляющей собой сигнал, сформированный по технологии OFDM, при различных долях перекрытия частотных полос полезного СШП сигнала и OFDM помехи. Исследована зависимость помехоустойчивости СШП систем от степени подавления синхросигналов OFDM помехой.
3. Получены оценки помехоустойчивости исследуемых СШП систем радиодоступа при совместном использовании радиочастотного спектра с современными узкополосными и широкополосными системами радиодоступа на записях реальных сигналов последних, спектральные плотности мощности которых на 38 дБ выше чем у СШП систем радиодоступа.
4. Теоретически и экспериментально доказана возможность совместного использования радиочастотного спектра СШП систем радиодоступа с современными системами радиодоступа, полоса сигнала которых не превышает 30% полосы СШП сигнала, и определены

размеры полос сигналов современных систем радиодоступа, при которых рассматриваемые СШП системы еще могут обеспечивать приемлемые показатели качества.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в аналитическом описании обработки сигналов многочастотной СШП системы радиодоступа при наличии помехи, создаваемой другой многочастотной системой радиодоступа. Аналитическое описание представлено для двух способов формирования СШП сигнала:

- а) с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов;
- б) на основе дискретных частотных сложных сигналов.

Предложенное аналитическое описание легло в основу компьютерного моделирования, в ходе которого были получены потенциальные характеристики помехоустойчивости рассматриваемых СШП систем.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны рекомендации по совместному использованию РЧС в диапазоне частот 5 – 6 ГГц сигналами многочастотной СШП системы с сигналами WiFi;
- определены границы совместного использования РЧС многочастотными СШП системами с современными системами радиодоступа диапазона 5 – 6 ГГц, применяемыми на территориях аэропортов, вокзалов, спортивных комплексах, нефтеналивных и газораспределительных портов, где развернуты сети WiFi (современных узкополосных и широкополосных систем радиодоступа стандартов IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac);
- доказана возможность повышения до +30% эффективности использования РЧС при совместном его использовании многочастотными СШП системами радиодоступа и современными системами радиодоступа стандартов IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac;
- результаты работы использованы в Смоленском научно-инновационном центре радиоэлектронных систем «Завант» и в научно-исследовательских работах МТУСИ.

Практическое использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Результаты диссертации использованы:

- в НИР «Разработка макета сверхширокополосной системы передачи данных», выполненной в ООО СНИЦ РЭС «Завант»;
- в НИР «Исследование возможности применения СШП систем как вариант решения проблемы дефицита РЧС» (Отчет о НИР МТУСИ, Инв.№ 02201450090, Рег.№ 01201450011);
- в НИР «Исследование особенностей применения различных методов модуляции в многочастотных сверхширокополосных системах радиодоступа» (Отчет о НИР МТУСИ, Инв.№ 02201459198, Рег.№ 01201464658).
- в учебный процесс кафедры «Радиотехнических систем» МТУСИ.

Степень достоверности и апробация результатов. Основное содержание диссертации, а также результаты теоретических и экспериментальных научных исследований отражены в 21 публикации. Публикации включают 7 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК при Минобрнауки РФ, 2 рукописные работы (отчеты о НИР) и 12 статей в сборниках ма-

териалов конференций из них одна статья в сборнике, индексируемом базой данных Scopus. Из 21 публикации 14 опубликованы без соавторов.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью применения математических методов и подтверждается соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов, и численного моделирования.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15-ти научных конференциях, среди которых: отраслевые научные конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2012, 2013, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в мире коммуникаций» (Москва, 2012г.); Молодежном научном форуме МТУСИ «Телекоммуникации и инфокоммуникационные технологии – реалии, возможности, перспективы» (Москва, 2011 г.); «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Международной научно-технической конференции «INTERMATIC» (Москва, 2011, 2012, 2013, 2015, 2018 гг.); Международном форуме информатизации и международном конгрессе «Коммуникационные технологии и сети» (Москва, 2013г.); Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, 2014 г., 2017 г.); Международной научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» («СИНХРОИНФО 2015»); Международной научно-технической конференции «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» («WECONF» 2018г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Многочастотные СШП системы радиодоступа, построенные на основе разработанных в диссертации модифицированных структурных схем этих систем, обеспечивают совместное использование РЧС с современными узкополосными и широкополосными системами радиодоступа и позволяют увеличить относительную эффективность использования спектра от 0,27% (0,01 бит/с/Гц) до 28,6% (0,4 бит/с/Гц) при снижении помехоустойчивости на значение от 1,5 дБ до 10 дБ, соответственно.

2. Рассмотренные многочастотные СШП системы радиодоступа позволяют производить передачу данных в сенсорных сетях при обеспечении совместного использования РЧС и современных узкополосных и широкополосных систем радиодоступа.

3. Разработанные имитационные компьютерные модели многочастотных СШП систем позволяют исследовать взаимное влияние с системами радиодоступа стандарта IEEE 802.11 и возможность совместного использования радиочастотного спектра многочастотных СШП систем и систем данного стандарта при разности спектральных плотностей мощности этих систем, достигающей 38 дБ.

4. Разработанные рекомендации позволяют организовать эффективное совместное использование спектра при условии многолучевого канала с АБГШ многочастотными СШП системами радиодоступа с системами стандарта IEEE 802.11 при отсутствии смены режима устойчивости и перекрытии их спектров от 8% до 30% при отношении сигнал/шум от 11,5 дБ до 21 дБ, соответственно.

Личный вклад. Все результаты, сформулированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена та их часть, которая получена автором лично.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и трех приложений. Основная часть диссертации изложена на 179 страницах текста с 45 иллюстрациями и 19 таблицами. Список литературы насчитывает 182 наименования.

Соответствие положений выбранной специальности. Выносимые на защиту положения относятся к специальности «05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций», включающей, согласно паспорту, «вопросы ... новых методов обеспечения эффективного функционирования». Положения 2 и 3, выносимые на защиту, относятся к определенной в паспорте специальности области исследований, включающей «Исследование и разработка новых ... модемов, ... обеспечивающих высокую надежность обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех».

Положения 1 и 4 относятся к определенной в паспорте специальности области исследований, включающей «Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования».

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, проведен анализ современного уровня разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора, а также положения, выносимые на защиту.

В первом разделе изложены результаты исследований части РЧС, разрешенной для применения СШП систем, с целью выявления возможного наличия в этой части РЧС узкополосных и широкополосных помех. Мониторинг РЧС в диапазоне 2 - 11 ГГц проводился в Москве с помощью широкополосной всенаправленной измерительной антенны и анализатора спектра Agilent E4407B. В диапазоне 2,85 - 10,6 ГГц выявлены основные системы связи, создающие помехи для СШП систем радиодоступа.

Основными помехами для СШП систем радиодоступа являются: в диапазоне 2,85 - 5 ГГц – сигналы систем радиосвязи LTE и LTE Advanced; в диапазоне 5 - 6 ГГц – сигналы систем радиодоступа WiFi (a) и WiFi (n) (IEEE 802.11 a и IEEE 802.11 n) (большую полосу частот занимают системы радиодоступа WiFi (n) (40 МГц), коэффициент широкополосности этих систем имеет значение, близкое к границе определения узкополосных систем) и недавно разработанная широкополосная система WiFi (ac) (IEEE 802.11 ac), а также сигналы некоторых систем связи. Сигналы систем LTE и LTE Advanced, выявленные при мониторинге, занимают полосу меньшую, чем выявленные сигналы системы WiFi, поэтому в данной работе они не учитываются.

В данной работе рассматриваются предельные случаи проявления выявленных узкополосных (УП) и широкополосных (ШП) помех, т.е. УП системы, имеющие максимально возможную для УП систем ширину канала, и ШП системы, также имеющие максимальную ширину канала среди известных систем диапазона (Таблица 1).

Таблица 1 Параметры систем радиодоступа выявленных как помехи для СШП систем радиодоступа в диапазоне частот 2,85 - 10,6 ГГц

Диапазон частот, ГГц	Мощность РЭС, дБм	Занимаемая полоса, МГц	Коэффициент широкополосности	Технология, стандарт, название системы
3,4 – 3,6	23	5-20	0,025131 (ШП)	LTE Advanced ((3GPP TS 36.101 (Release 10); 3GPP TS 36.104 (Release 10); 3GPP TS 36.807 (Release 10))
3,6 – 3,8	23	5-20	0,023124 (ШП)	LTE Advanced ((3GPP TS 36.101 (Release 10); 3GPP TS 36.104 (Release 10); 3GPP TS 36.807 (Release 10))
5,15 – 5,35; 5,65 – 6,425	20 30	20	0,003875 (УП)	WiFi (a) (IEEE 802.11 a)
5,15 – 5,35; 5,65 – 6,425	20 30	40	0,007273 (УП)	WiFi (n) (IEEE 802.11 n)
5,15 – 5,35; 5,65 – 6,425	30	160	0,031496 (ШП)	WiFi (ac) (IEEE 802.11 ac)
5 – 6	26	28	0,01508 (УП)	WiMAX (IEEE 802.16)

Для реализации принципа совместного использования РЧС предлагаются многочастотные СШП системы радиодоступа. Решением ГКРЧ от 15.12.2009г. №09-05-02 СШП системы радиодоступа определены как системы, работающие в нелицензируемой части спектра (2,85 - 10,6 ГГц) и использующие для передачи полосу частот не менее 500 МГц. В связи с малой спектральной плотностью излучения таких систем (не более $-62,5$ дБ/МГц), они являются системами ближнего радиуса действия (около 100 м). Областью их применения является внутриофисные сети радиодоступа и обмена данными.

Определен диапазон частот для исследования возможности совместного использования СШП системами РЧС с узкополосными (УП) и широкополосными (ШП) системами радиодоступа. Диапазон частот, в котором проводились исследования – 5 – 6 ГГц. Уникальность этого диапазона заключается в том, что его используют как УП, так и ШП системы радиодоступа. Таким образом, системы, работающие в диапазоне частот 5 - 6 ГГц (WiFi (IEEE 802.11a/n), и недавно разработанная система WiFi (IEEE 802.11ac)) определены как узкополосные и широкополосные системы, соответственно.

Проведен анализ систем по соотношению обеспечиваемой скорости передачи данных к занимаемой полосе частот, которое используется как критерий эффективности использования РЧС. Анализ проводился как для многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологии OFDM с кодовым разделением абонентов, так и для СШП системы радиодоступа с дискретными частотными (ДЧ) сигналами. Разработаны имитационные модели этих многочастотных СШП систем.

Функциональная схема разработанной в данной работе модели системы связи, учитывающей наличие мощных помех, представлена на рисунке 1.

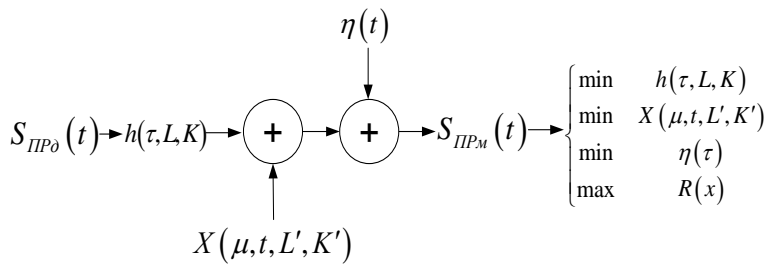


Рисунок 1 Функциональная схема модели системы связи с учётом УП и ШП помех.

Задачи данной работы сводятся к следующему функционалу (формула 1):

$$F(x, \mu, L, K, L', K', \tau, t) = \begin{cases} \min & h(\tau, L, K) \\ \min & X(\mu, t, L', K') \\ \min & \eta(\tau) \\ \max & R(x) \end{cases} = \begin{cases} \min X(\mu, t, L', K'); \\ \min h(\tau, L, K,); \\ \min \eta(\tau); \\ \max R(x). \end{cases} \quad (1)$$

где: x – отсчёты передаваемого сообщения; μ – коэффициент широкополосности рассматриваемых систем радиодоступа (СШП, ШП, УП); τ – запаздывание луча в кластере относительно времени запаздывания первого луча, описываемые моделью канала; L – количество кластеров, учитываемых в модели канала; K – количество лучей, учитываемых моделью канала; $R(x)$ – вероятность правильного приёма передаваемой информации; параметры канала со штрихом (L' , K'), статистически независимые с аналогичными параметрами канала без штриха (L , K), так как источник помех может находиться в другой точке пространства.

Необходимо:

1. Минимизировать влияние канала – $\min h(\tau, L, K)$ и $\min \eta(\tau)$;
2. Минимизировать влияние помех – $\min X(\mu, t, L', K')$;
3. Максимизировать вероятность правильного приёма передаваемого сообщения – $\max R(x)$.

Для решения этой многокритериальной задачи потребовалось: исследовать свойства многочастотной СШП системы с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов и многочастотной СШП системы с ДЧ сигналами; разработать модели этих систем и поставить компьютерный эксперимент с целью оценки качественных характеристик систем, работающих в условиях многолучевого канала связи с АБГШ; оценить возможность совместного использования радиочастотного спектра с другими радиослужбами; оценить влияние узкополосных и широкополосных помех на работу исследуемых СШП систем. На основе анализа полученных результатов выработаны рекомендации по применению многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, а также многочастотной СШП системы с ДЧ сигналами.

Во втором разделе диссертации представлены результаты разработки и исследования многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, позволяющие повысить ее помехозащищенность и эффективность использования РЧС, а также увеличить количество абонентов многочастотной СШП системы с OFDM за счет большой базы сигнала. В связи с этим в «базу раз» снижается скорость передачи информации для каждого абонента.

Комплексная огибающая сигнала многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов описывается следующим выражением:

$$X(n) = \left(\frac{1}{N} \sum_{p=0}^{P-1} \left(\sum_{u=0}^{U-1} d_u(p)c_u(p) + V(p) \right) e^{j2\pi p \frac{n}{N}} \right) e^{j2\pi f_0 n} \quad (2)$$

где: $u \in \{0,1,2,\dots,U-1\}$ – номер абонента; U – количество абонентов; n – номер отсчёта, количество отсчётов $N=128$; p – номер гармоники (поднесущей); P – количество поднесущих до префикса (128 отсчётов, минус префикс – 100 отсчётов); $d_u(p)$ – отсчёты передаваемого сообщения абонента с номером u ; $c_u(p)$ – отсчёты кодовой последовательности абонента с номером u ; f_0 – центральная частота рабочего частотного канала; f_d – частота дискретизации, $V(p)$ – служебные символы.

Предложена и разработана модифицированная структурная схема исследуемой системы, изображенная на рисунке 2. Отличительными особенностями рассматриваемой многочастотной СШП системы является дополнительное кодирующее устройство абонента в передатчике и блок выделения сигнала от нужного абонента на приемной стороне, обеспечивающие кодовое разделение абонентов, а соответственно, и кодовое уплотнение сигналов в полосе частот системы.

Одним из параметров системы радиодоступа является спектральная плотность излучаемого сигнала. Решением ГКРЧ от 15 декабря 2009г. № 09-05-02 «О результатах работ по конверсии радиочастотного спектра по вопросу использования полосы радиочастот 2,85-10,6 ГГц сверхширокополосными беспроводными устройствами» определяются разрешенные уровни излучения для СШП систем в различных диапазонах частот, однако маска спектра излучения в одном частотном канале для конкретной СШП системы не определена. В диссертационной работе предложена маска спектра исследуемой СШП системы в одном частотном канале с минимально разрешенной шириной одного частотного канала, используемом системой для передачи данных.

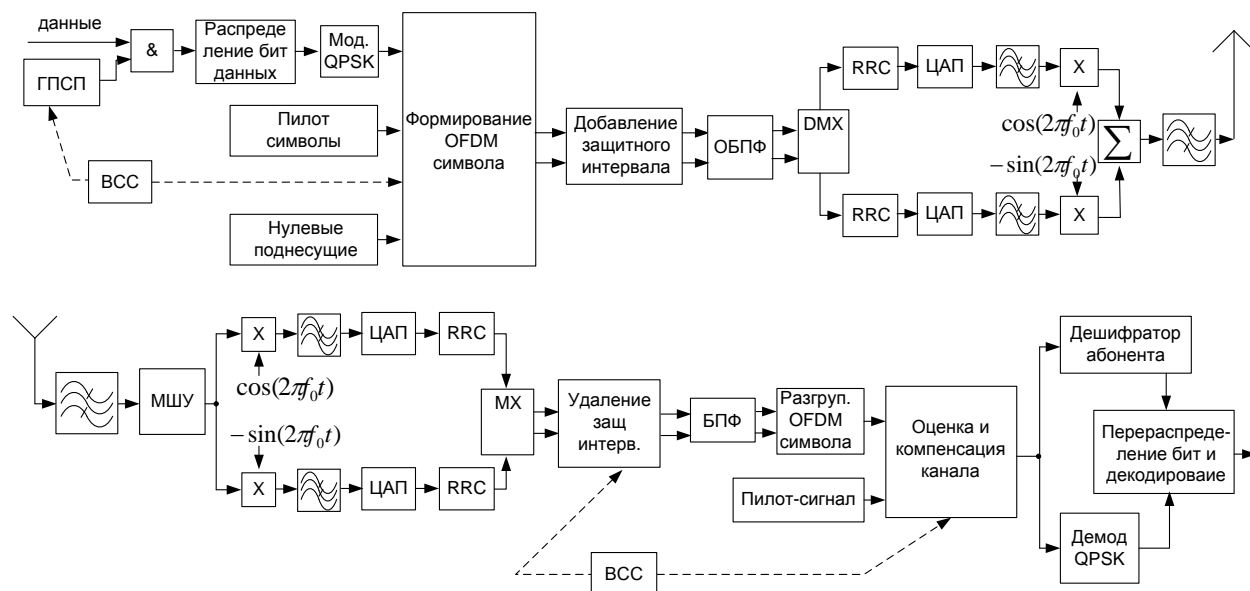


Рисунок 2 Структурная схема многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов

Маска спектра сигнала одного частотного канала передатчика (рисунок 3) имеет следующие точки:

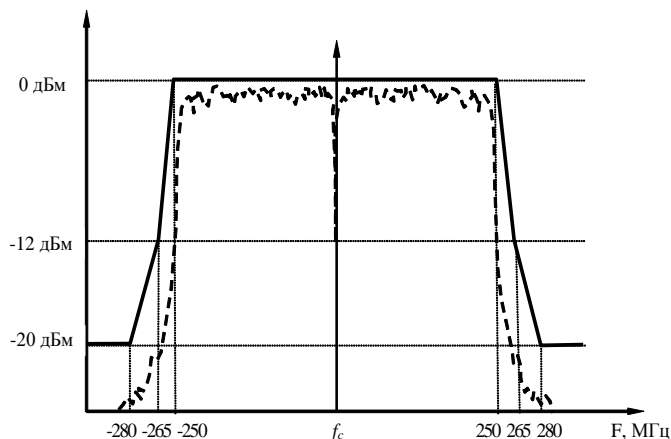


Рисунок 3 Спектральная плотность мощности генерируемого сигнала и маска спектра

- уровень излучения 0 дБ (относительно максимума спектральной плотности сигнала) от -250 до 250 МГц относительно центральной частоты;
- - 12 дБ при частотной отстройке ± 265 МГц и
- - 20 дБ при частотной отстройке ± 280 МГц и больше.

Проведен расчет основных характеристик многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов с учетом

предложенной маски спектра.

1. Разработанная модифицированная структурная схема многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов обеспечивает скорость передачи данных до 200 Мбит/с для 129-ти абонентов, разделяемых при помощи последовательностей Голда длиной 127 бит.
2. Предложенная с учётом требований ГКРЧ маска спектра сигнала в одном частотном канале многочастотной СШП системы позволяет осуществлять частотное планирование исследуемой системы радиодоступа с шириной канала в 500 МГц.
3. Основные параметры исследуемой многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов позволяют разработать компьютерную модель системы и произвести компьютерное моделирование её работы в условиях многолучевого канала с мощными УП и ШП помехами с учётом предложенной маски спектра.

Третий раздел диссертации посвящен исследованию возможности совместного использования радиочастотного спектра многочастотной СШП системой радиодоступа с дискретным частотным (ДЧ) сигналом, сформированным на основе частотно-временной матрицы (ЧВМ). Частотно-временная матрица описывает порядок работы частотных субканалов на рабочих временных интервалах (рисунок 4).

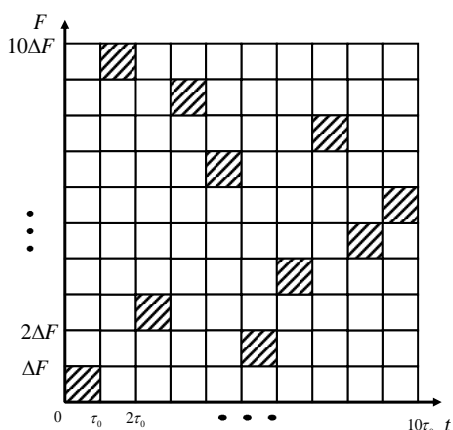


Рисунок 4 Частотно-временная матрица на основе матрицы Костаса

На практике ДЧ сигналы, обладающие только одним частотным элементом на одном временном интервале, получили наибольшее распространение и считаются сигналами первого порядка. Рассматриваемая СШП система радиодоступа с ДЧ сигналом является частным случаем ДЧ систем. В ней применяются сигналы первого порядка, количество временных интервалов равно количеству частотных субканалов $M = N$.

Применение ЧВМ позволяет увеличить число абонентов. Количество абонентов, разделяемых время-частотными кодами (строки ЧВМ), ограничено количеством частотных подканалов и время-частотной матрицей. Время-частотные коды состоят из символов,

принадлежащие одному и тому же алфавиту $(0, 1, \dots, M-1)$, при разделении нескольких абонентов возможны совпадения частотных субканалов.

В данной работе рассматривается частный случай ДЧ систем, для обеспечения допустимого уровня взаимных помех которых выбран вариант с одним перекрытием время-частотных кодов. То есть, количество абонентов кратно количеству частотных субканалов и может достигать 200:

$$L = \begin{cases} M, & \text{при четных } M \\ M-1, & \text{при нечетных } M \end{cases}$$

ДЧ сигнал является сложным, соответственно, одной из важнейших характеристик такого сигнала является его база $B = M\Delta f M\tau \approx M^2$.

Сигнал в частотных субканалах рассматриваемой системы будет обладать свойствами узкополосного сигнала, поэтому можно вычислить огибающую сигнала СШП системы радиодоступа с ДЧ сигналом как сумму огибающих узкополосных сигналов.

Комплексная огибающая сигнала исследуемой системы в отсутствие помех и влияния канала определяется по формуле (3):

$$S_U(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{M-1} a_u(v) \Phi(t - n\Delta t) \exp(i\gamma_u(v)\Delta\omega t) \quad (3)$$

где: u – номер абонента; $a_u(v)$ – комплексная амплитуда v -го частотного субканала; $\Phi(t)$ – форма сигнала временного элемента; $\Delta\omega$ – шаг сетки частот; $\gamma_u(v)$ – символ частотной кодовой последовательности; n – номер временного элемента; M – число частотных субканалов; N – число временных слотов. В данной работе рассмотрен случай квадратной частотно-временной матрицы, в которой $N = M$.

Выполнен расчет основных характеристик исследуемой системы.

На рисунке 5 представлены модифицированные структурные схемы формирователя и приемника многочастотного сверхширокополосного ДЧ сигнала и рассчитаны основные характеристики исследуемой системы радиодоступа.

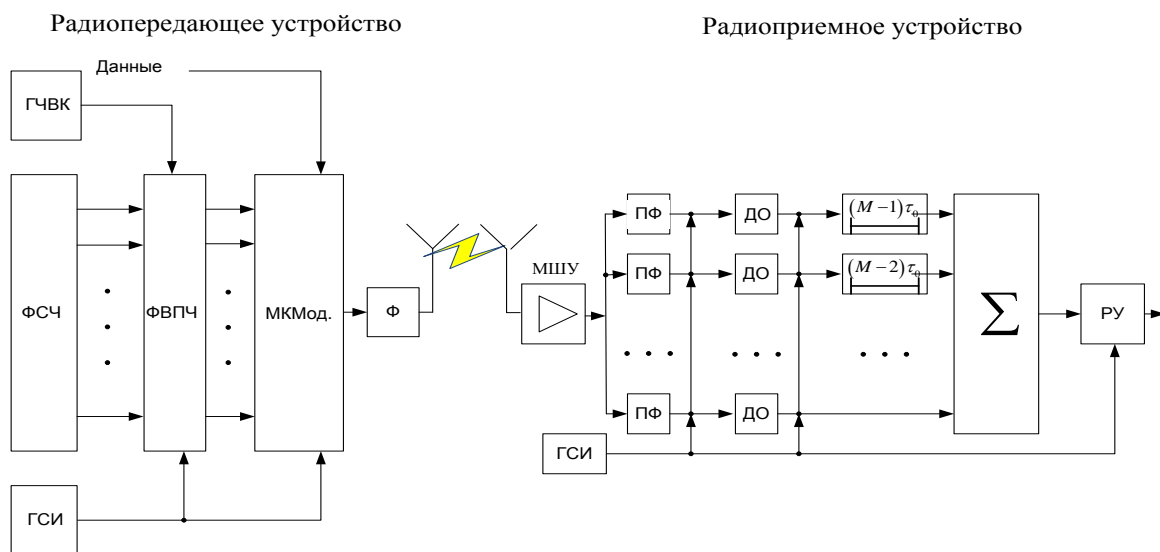


Рисунок 5 Структурная схема ДЧ сверхширокополосной системы

Формирователь сетки частот (ФСЧ) вырабатывает гармонические колебания с частотами, расположенными в диапазоне, выделенном для данной системы. Формирователь временной последовательности частот (ФВПЧ) устанавливает порядок работы системы на поднесущих частотах во временной области в соответствии с законом распределения частот ЧВМ, сформированным генератором частотно-временного кода (ГЧВК). В многоканальном модуляторе (МкМод) производится модуляция сформированных сигналов в соответствии с битовой последовательностью данных.

Определены и рассчитаны параметры рассматриваемой многочастотной СШП системы радиодоступа с ДЧ сигналом и рассчитана теоретическая АКФ применяемого ДЧ сигнала на основе массива Костаса. Его огибающая повторяет АКФ, решающее устройство (РУ) по соответствующему уровню центрального лепестка принимает окончательное решение о приеме сложного ДЧ сигнала. Устройства формирования и приема сложного ДЧ сигнала, в принципе, не отличаются от известных, однако при построении ДЧ СШП системы радиодоступа частотная и элементная база устройств должна быть более широкополосной.

На основе полученных оценок помеховой обстановки в диапазоне частот, разрешённом для применения СШП систем, **в четвёртом разделе** предложена модель сигнала на входе приёмника, учитывающая не только влияние канала связи, но и влияние узкополосных и широкополосных помех:

$$S_{\text{ПРМ}}(t) = S_{\text{ПРД}}(t) * h(\tau, L, K) + X(\mu, t, L', K') + \eta(t), \quad (4)$$

где: $S_{\text{ПРД}}(t)$ – сигнал на выходе передатчика рассматриваемой СШП системы; $h(\tau, L, K)$ – импульсная характеристика канала, описываемая моделью Салеха-Валенсуэла; $X(\mu, t, L', K')$ – модель помехи, учитывающая коэффициент широкополосности помехи μ и влияние на неё канала связи; параметры канала со штрихом (L', K') статистически независимы с аналогичными параметрами канала без штриха (L, K), так как источник помех может находиться в другой точке пространства; $\eta(t)$ – АБГШ.

В соответствии с моделью Салеха-Валенсуэла, импульсная характеристика (ИХ) канала определяется как

$$h(\tau, L, K) = \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K \beta_{k,l} \delta(t - T_l - \tau_{k,l})$$

где: $\delta(\cdot)$ – дельта-функция; T_l – время запаздывания l -го пучка (кластера); $\tau_{k,l}$ – запаздывание k -го луча в l -м кластере относительно времени запаздывания первого луча; $\beta_{k,l}$ – амплитуда k -го луча в l -м кластере.

Источниками мощной помехи $X(\mu, t, L', K')$ являются известные системы радиодоступа стандарта IEEE 802.11n (узкополосная помеха) и IEEE 802.11ac (широкополосная помеха), работающие во внутриофисном кластере единой сети электросвязи. Для формирования сигналов этих систем применяется технология OFDM. Среда распространения радиоволн оказывает одинаковое влияние на полезный сигнал и на помеху, рассмотренную в работе и описываемую как

$$X(\mu, t, L', K') = \Theta(t, \mu) * h'(\tau, L', K'), \quad \text{где: } \Theta(t, \mu) \text{ – модель помехи.}$$

Разработанная в данной работе структурная схема модели канала связи, учитывающая наличие мощных помех, представлена на рисунке 6.

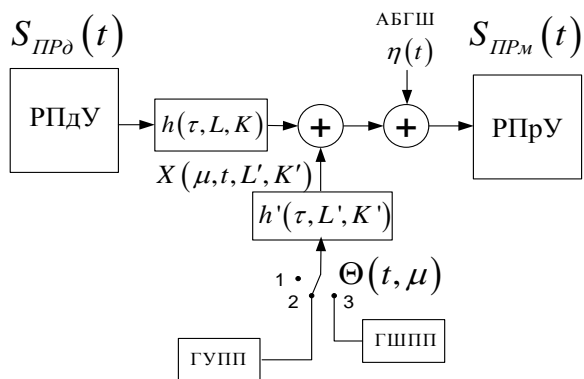


Рисунок 6 Структурная схема модели канала связи с учётом УП и ШП помех

полосной системы радиодоступа стандарта WiFi (IEEE 802.11n) и широкополосной системы стандарта WiFi (IEEE 802.11ac) и являются копиями сигналов реальных систем, записанных в программе 89600 VSA векторного анализа сигналов Agilent Technologies.

Для формирования сигналов этих систем применяется технология OFDM. Таким образом, сигналы с выходов генераторов помех, занимают, в соответствии со спецификациями семейства стандарта WiFi, полосы частот шириной 40 и 160 МГц. Сигналы с выходов этих генераторов претерпевают искажения, описываемые $h(\tau, L', K')$, и подаются на вход сумматора, где они складываются с сигналом исследуемой СШП системы, который прошел через канал с импульсной характеристикой $h(\tau, L, K)$, описываемой моделью Салеха-Валенсуэла. Для получения полной картины влияния канала на сигнал при моделировании канала вместе с моделью Салеха-Валенсуэла применяется модель канала с АБГШ.

Программное обеспечение Agilent 89601BE VSA имеет возможность воспроизведения записанных сигналов в качестве источников сигналов при моделировании для проверки разрабатываемых устройств. Одной из особенностей этого программного обеспечения является возможность транслировать данные в программное обеспечение MATLAB. Таким образом, реальные сигналы систем WiFi: IEEE 802.11n и IEEE 802.11ac транслировались в программную среду Matlab/Simulink и использовались в качестве узкополосных и широкополосных помех, соответственно.

Результаты компьютерного моделирования работы разработанных моделей исследуемых многочастотных СШП систем радиодоступа без учета влияния канала выявили, что ошибки разработанных компьютерных имитационных моделей многочастотных СШП систем радиодоступа, рассматриваемых в работе, не превышают погрешности измерений, что свидетельствует об адекватности разработанных компьютерных имитационных моделей.

В пятом разделе описан полунатурный компьютерный эксперимент, в результате которого оценена возможность совместного использования радиочастотного спектра исследуемыми многочастотными СШП системами радиодоступа с современными узкополосными и широкополосными системами радиодоступа стандартов IEEE 802.11 n и IEEE 802.11 ac, соответственно.

Было выявлено, что результаты компьютерного моделирования работы разработанных моделей исследуемых многочастотных СШП систем радиодоступа в условиях известной модели многолучевого канала аналогичны результатам работы известной СШП системы MB-OFDM в тех же условиях многолучевого канала описываемого моделью Салеха-Валенсуэла.

Радиопередающим (РПДУ) и радиоприёмным (РПРУ) устройствами на схеме рисунка 4.3 являются имитационные модели передатчиков и приёмников, рассматриваемых в данной работе СШП систем. В качестве имитаторов помех на схеме представлены генераторы узкополосной помехи (ГУПП) и широкополосной помехи (ГШПП), соответственно. Сигналы, формируемые этими генераторами, соответствуют физическому уровню излучаемых сигналов узкополосной системы радиодоступа стандарта WiFi (IEEE 802.11n) и широкополосной системы стандарта WiFi (IEEE 802.11ac) и являются копиями сигналов реальных систем, записанных в программе 89600 VSA векторного анализа сигналов Agilent Technologies.

Моделирование СШП системы проводилось для модели многолучевого канала с наихудшими условиями. В качестве моделей УП и ШП помех были выбраны сигналы соответствующих систем WiFi, присутствующие в выбранных диапазонах частот. Учитывая спектральную плотность мощности помех, которая превышает спектральную плотность мощности сигнала рассматриваемой многочастотной СШП системы на 37,8 дБ, можно говорить о перекрытии части спектра помехой. Полоса частот учитываемых узкополосной (УП) и широкополосной (ШП) стационарных помех равны 40 МГц и 160 МГц, соответственно. Сигналы, являющиеся помехами, транслируются из программного обеспечения Agilent 89601BE VSA.

На рисунке 7 представлены спектрограммы, иллюстрирующие работу многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, при наличии в канале УП и ШП помехи, соответственно.

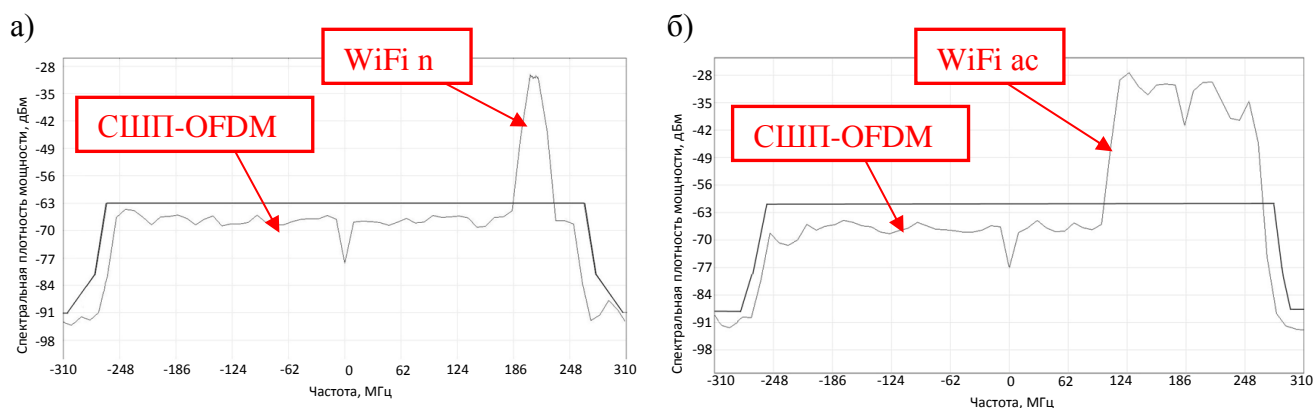


Рисунок 7 Спектральная плотность мощности сигнала многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов в многолучевом канале с АБГШ и а) УП помехой; б) ШП помехой.

Результатами компьютерного эксперимента являются зависимости вероятности ошибки от ОСШ в рассматриваемой системе с учётом многолучёвости канала, АБГШ, УП и ШП помех (рисунок 8) для случаев: 1 – без помех; 2 – с УП помехой (см. рис. 7а); 3 – с ШП помехой (см. рис. 7б). Эксперимент проводился в условиях многолучевого канала, определяемых моделью Салеха-Валенсуэла с наихудшими условиями и АБГШ. Многочастотная СШП система с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов в условиях канала, описываемых моделью CM4, обеспечивает на приёме уровень вероятности битовой ошибки 10^{-3} при ОСШ равном 10,5 дБ (кривая 1 на рисунке 8).

При наличии в канале мощной УП помехи (кривая 2 на рисунке 8) вероятность битовой ошибки 10^{-3} достигается при ОСШ, равном 15,6 дБ. При этом наблюдается ухудшение помехоустойчивости на 5,1 дБ по сравнению с результатами работы системы в канале без помех.

Значение вероятности ошибки 10^{-3} достигается при ОСШ, равном 20,5 дБ, при действии ШП помехи (кривая 3 на рисунке 8); снижение вероятности ошибки приводит к появлению постоянного уровня ошибки, обусловленного мощной ШП помехой, как и в случае с УП помехой, описанном выше. При наличии в канале ШП помехи ухудшение помехоустойчивости составит 10 дБ относительно случая без помехи.

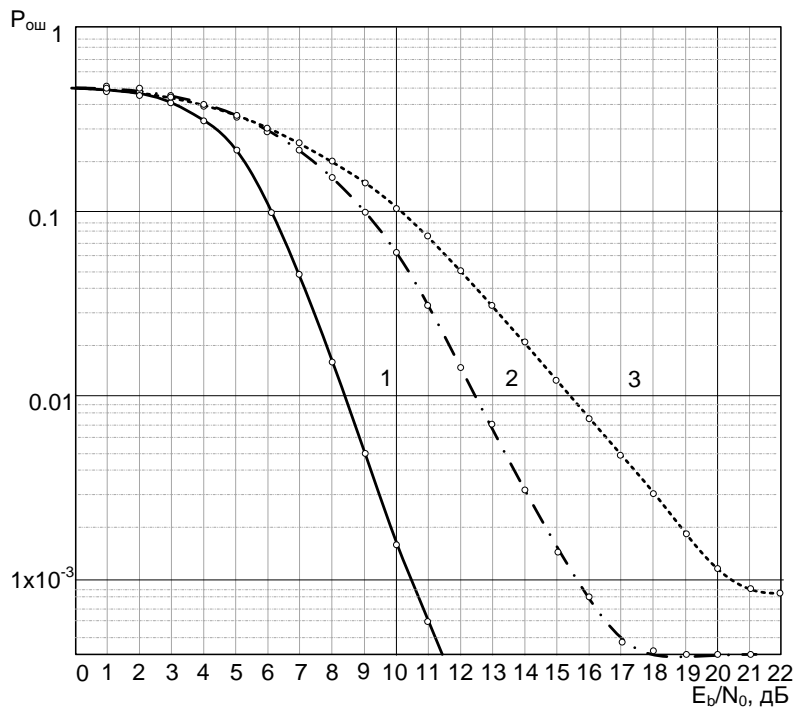


Рисунок 8 Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов в многолучевом канале с УП и ШП помехами.

абонентов помехоустойчивость этой системы сначала снижается медленно (с увеличением ширины полосы помехи до 40%), а затем – резко (при увеличении ширины полосы помехи от 40% до 90%), так как доля подавленных помехой каналов сильно увеличивается. Поэтому при действии сигнала помехи, которая перекрывает спектр исследуемой помехи от 40 % до 90% и более, передача данных с помощью исследуемой многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов нецелесообразна. Результаты исследования показывают, что перекрытие спектров сигнала и помехи в 36% является граничным вариантом, так как при увеличении доли закрытых помехой каналов постоянный уровень вероятности ошибки близок к 10^{-3} и мало меняется относительно 40%-го перекрытия спектра.

На рисунке 9 представлены результаты исследования совместного использования спектра многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов с современными системами радиодоступа диапазона 5 – 6 ГГц, как узкополосных, так и широкополосных, которые перекрывают спектр исследуемой СШП системы от 4% до 90%.

Эти результаты показывают, как меняется помехоустойчивость многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов при наличии не только рассматриваемых помех в полосе канала, но и для значений отношения полос помехи и полезного сигнала: 0%; 4%; 8%; 12%; 20%; 24%; 30%; 36%; 40%; 44%; 50%; 60%; 90% (рисунок 9) получены зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ

Влияние на многочастотную СШП систему с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов широкополосной помехи на 4,9 дБ больше, чем узкополосной помехи. В связи с этими фактами имеет смысл пересмотреть возможность передачи данных в канале совместно с другими ШП системами радиодоступа.

При дальнейшем увеличении ширины частотного канала, занимаемого помехой, то есть при перекрытии спектра исследуемой многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологии OFDM и кодового разделения

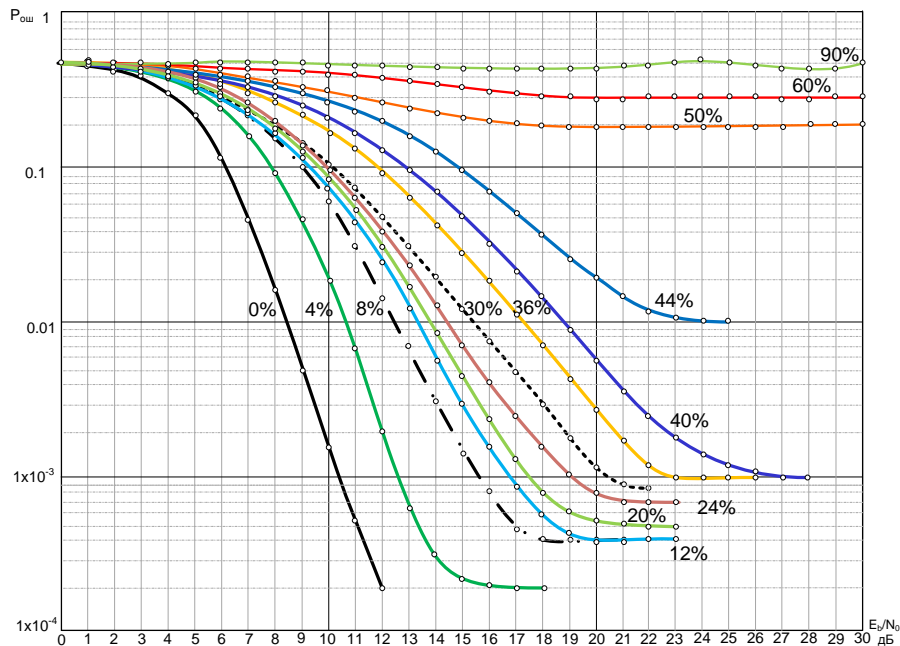


Рисунок 9 Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов в многолучевом канале с различным значением отношения полос помехи и полезного сигнала, от отношения ширины полос спектров помехи и полезного сигнала. Данная зависимость получена из результатов, представленных на рисунке 9.

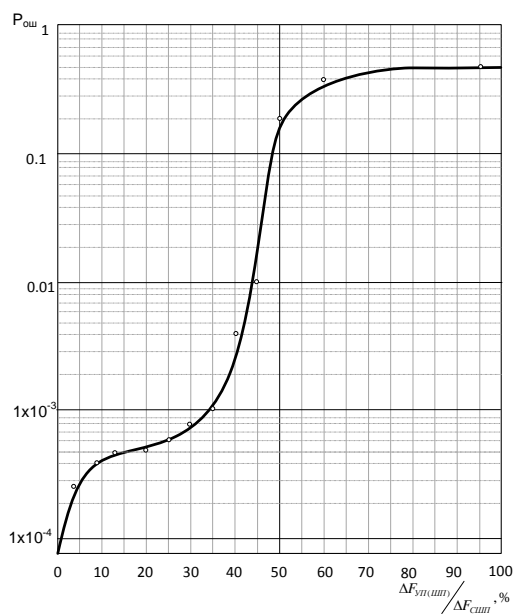


Рисунок 10 Зависимости вероятности ошибки, обеспечиваемой системой многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, от отношения ширины полос спектров помехи и полезного сигнала.

помехи в области нижних частот подавляет нулевые, заградительные поднесущие, поднесущие передаваемых данных и несколько пилот-поднесущих. Такое положение помехи оказывает наименьшее влияние на СШП систему, при этом наблюдается снижение помехоустойчиво-

В результате при приближении доли перекрытых поднесущих, передающих не только данные, но и сигнал синхронизации, к 50% синхронизация системы заметно ухудшается, за счет чего и снижается помехоустойчивость, а затем синхронизация вообще нарушается.

На рисунке 10 представлена зависимость вероятности ошибки, обеспечиваемой системой многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологий OFDM и ко-

Влияние на работу исследуемой многочастотной СШП системы может оказывать не только отношение ширины полос спектров помехи и полезного сигнала, но и положение этой помехи на оси частот. Данная тема не рассматривается в диссертации, она требует отдельного исследования. Однако в данной работе были проведены компьютерные эксперименты, которые позволяют оценить влияние положения помехи в спектре исследуемой СШП системы и обозначить тематику и направление дальнейших исследований.

Для примера исследования проведены для отношения полос помехи и полезного сигнала равного 12%. Было рассмотрено три возможных положения помехи: наличие помехи в области нижних частот (кривая «12% мин» на рисунке 11); в середине половины спектра СШП системы (12% ср.); в области центра спектра (12% макс).

В результате было выявлено, что наличие

сти на 6,3 дБ. Наличие помехи в середине половины спектра СШП системы подавляет большую часть поднесущих с данными и несколько пилот-поднесущих – помехоустойчивость снижается уже на 11,5 дБ.

Наличие помехи в области центра спектра СШП системы не только подавляет большую часть поднесущих передаваемых данных и несколько пилот-поднесущих, но и ухудшает синхронизацию СШП системы.

В связи с тем, что сигналы двух рассматриваемых в работе многочастотных СШП систем имеют спектры, которые удовлетворяют требованиям предложенной маски спектра и имеют одинаковое значение спектральной плотности мощности на выходе передатчика, а также рассматриваемые в данной работе помехи влияют одинаково и на многочастотную СШП систему радиодоступа с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов, и на многочастотную СШП систему радиодоступа на основе использования дискретных частотных сложных сигналов, то рассмотренные результаты справедливы и для последней.

Таким образом, исследование совместного использования РЧС многочастотной СШП системы на основе использования дискретных частотных сложных сигналов имеет смысл при значениях отношения полос помехи и полезного сигнала до 30%.

Таким образом, условия эксперимента остаются неизменными как для многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, так и для многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом. Требования, параметры и характеристики многолучевого канала с АБГШ, УП и ШП помех в эксперименте с многочастотной СШП системой с ДЧ сигналом принимают те же значения, что и в эксперименте с многочастотной СШП системой с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов.

На рисунке 12 представлены спектрограммы, иллюстрирующие работу многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом, при наличии в канале УП и ШП помехи, соответственно. Компьютерная имитационная модель многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом учитывает не только влияние многолучевого канала с АБГШ, но и УП и ШП помехи. Эта модель пригодна для проведения эксперимента, работоспособна и достаточно точно имитирует работу рассматриваемой системы в заданных условиях канала и при воздействии рассматриваемых в данной работе помех.

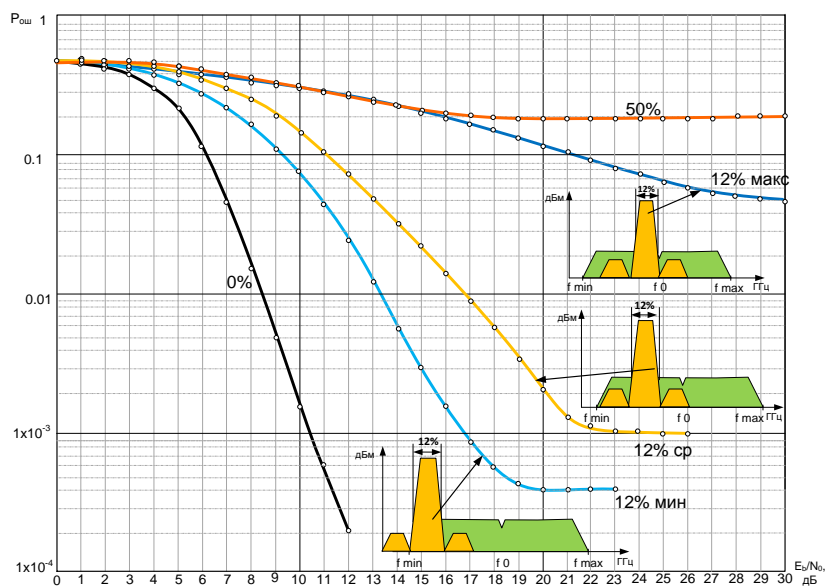


Рисунок 11 Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов в многолучевом канале с УП и ШП помехами.

Так же, как и для эксперимента с многочастотной СШП системой с совмещением технологий

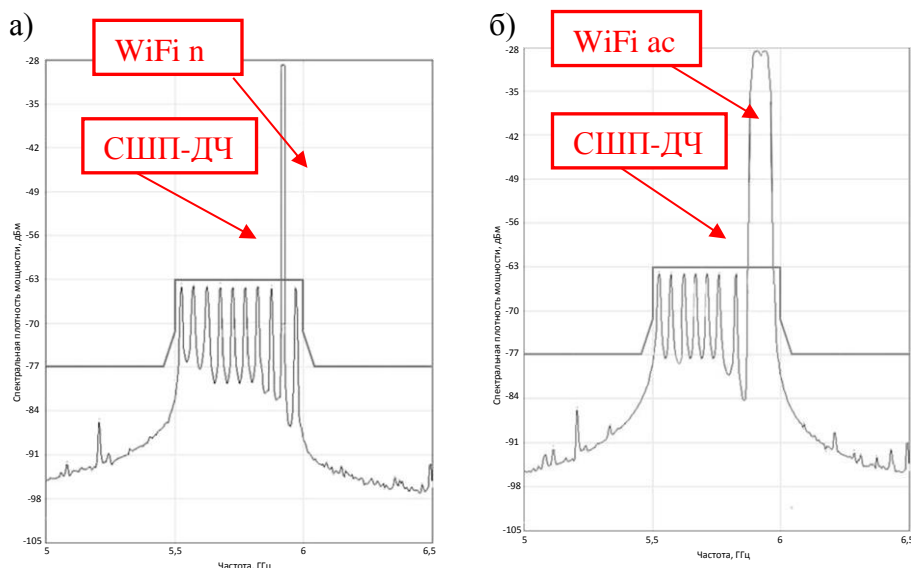


Рисунок 12 Спектральная плотность мощности многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом в многолучевом канале с АБГШ и а) УП помехой; б) ШП помехой.

OFDM и кодового разделения абонентов, в данном эксперименте (с многочастотной СШП системой с ДЧ сигналом) получены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум (рисунок 13) для случаев: 1 – без помех; 2 – с УП помехой (см. Рис. 12 а); 3 – с ШП помехой (см. Рис. 12 б).

Многочастотная СШП система с ДЧ сигналом в условиях канала, описываемых моделью СМ4, рассмотренной в настоящем разделе, на приеме обеспечивает уровень вероятности битовой ошибки 10^{-3} при значении сигнал/шум равном 10,8 дБ (график 1 на рисунке 13).

При наличии в канале УП помехи рассматриваемая система обеспечивает заданный уровень ошибки 10^{-3} при отношении сигнал/шум 11,6 дБ (график 2 на рисунке 13). Соответственно, проигрыш в помехоустойчивости составит 0,8 дБ, относительно канала без помех.

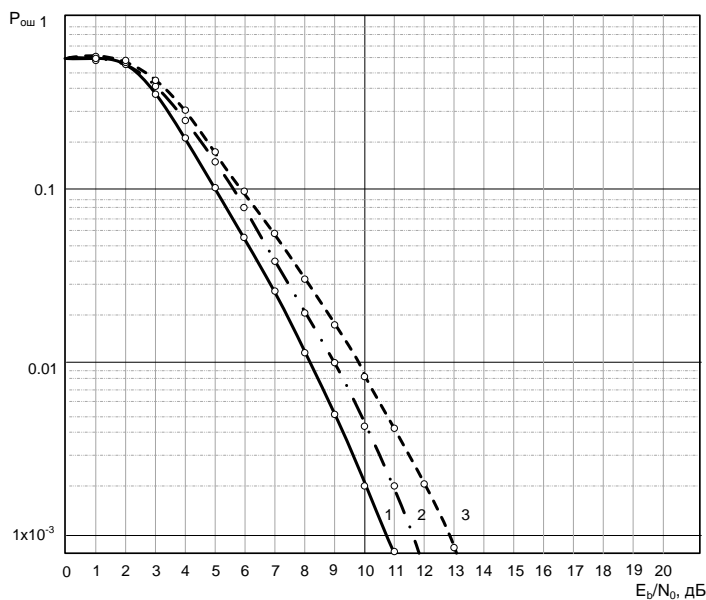


Рисунок 13 Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом в многолучевом канале с УП и ШП помехами.

При воздействии на рассматриваемую СШП многочастотную систему ШП помехи обеспечивает заданный уровень ошибки 10^{-3} при отношении сигнал/шум 12,9 дБ (график 3 на рисунке 13), наблюдается ухудшение помехоустойчивости на 2,1 дБ относительно канала без помех. Влияние на многочастотную СШП систему с ДЧ сигналом широкополосной помехи на 1,3 дБ больше, чем узкополосной помехи.

УП системами радиодоступа.

Следовательно, многочастотная СШП система с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов обеспечивает совместное использование радиочастотного спектра с

Совместное использование спектра на основе многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов возможно с ШП системами радиодоступа при условии, что обеспечиваемый уровень ошибок будет выше (например, 10^{-2}) или

в рассматриваемой системе будут реализованы эффективные методы борьбы с помехами. В противном случае должна быть пересмотрена возможность работы в данной полосе частот.

По результатам, полученным в эксперименте с теми же условиями для многочастотной СШП системы с ДЧ, выявлены следующие особенности. Многочастотная СШП система с ДЧ обеспечивает уровень вероятности ошибки, равный 10^{-3} в канале без помех при ОСШ 10,8 дБ. При наличии в канале УП помехи наблюдается снижение помехоустойчивости на 0,8 дБ. Наличие в канале ШП помехи сопровождается снижением помехоустойчивости рассматриваемой многочастотной СШП системы на 2,1 дБ, относительно канала без помех.

Для многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом перекрытие спектра помехой равняется: для УП помехи – 8%, для ШП помехи около 30%. Узкополосная помеха искажает сигналы в одном частотном канале, широкополосная помеха вносит искажения в сигналы 3-х частотных каналов многочастотной сверхширокополосной системы с ДЧ сигналом. Таким образом, радиодоступ, организованный на основе многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом, позволяет совместно использовать радиочастотный спектр как с УП системами радиодоступа, так и с ШП системами. Рассмотренная особенность многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом обусловлена сложным сигналом этой системы - сигналом с большой базой.

В результате сравнительного анализа полученных результатов имитационного моделирования многочастотной СШП системы с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов и многочастотной СШП системы с ДЧ сигналом с результатами схожей известной СШП системы MB-OFDM в условиях известной модели многолучевого канала (модели Салеха-Валенсуэла) выявлено, что разработанные в данной работе модели исследуемых систем радиодоступа в условиях многолучевого канала имеют выигрыш в помехоустойчивости 0,4 дБ и 0,1 дБ, соответственно, относительно модели CM4.

Проведен расчёт эффективности использования РЧС исследуемых СШП систем радиодоступа. В результате анализа полученных при расчёте данных выявлено, что при совместном использовании РЧС современными существующими системами радиодоступа с многочастотной СШП системой с совмещением технологии OFDM и кодового разделения абонентов относительная эффективность использования спектра повышается до 28,6%, а при совместном использовании РЧС современными существующими системами радиодоступа с многочастотной СШП системой с ДЧ сигналами относительная эффективность использования спектра повышается до 0,4%.

В результате расчёта было выявлено, что минимальное влияние многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов на УП систему радиодоступа стандарта IEEE 802.11n, при их совместной работе в одном диапазоне частот, обеспечивается на расстоянии не менее 3,5 м, а при совместной работе в диапазоне частот с ШП системой радиодоступа стандарта IEEE 802.11ac минимальное влияние многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов обеспечивается на расстоянии не менее 0,22 м.

В результате расчёта было выявлено, что минимальное влияние многочастотной СШП системы радиодоступа с ДЧ сигналами на УП системой радиодоступа стандарта IEEE 802.11n, при их совместной работе в одном диапазоне частот, обеспечивается на расстоянии не менее 1,12 м, а при совместной работе в диапазоне частот с ШП системой радиодоступа стандарта

IEEE 802.11ac минимальное влияние многочастотной СШП системы радиодоступа с ДЧ сигналами обеспечивается на расстоянии не менее 0,07 м.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Предложены и разработаны усовершенствованные структурные схемы СШП систем радиодоступа на основе совмещения технологий OFDM и кодового разделения абонентов, а также систем с дискретными частотными сигналами на основе массива Костаса.
2. Проведен анализ характеристик многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов и многочастотной СШП, а также системы радиодоступа с дискретными частотными сигналами и даны рекомендации по их применению для организации совместного использования РЧС с другими современными системами радиодоступа.
3. Разработаны имитационные компьютерные модели многочастотной СШП системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов и многочастотной СШП системы радиодоступа с дискретными частотными сигналами, учитывающие влияние многолучевого канала с АБГШ и мощных стационарных узко- и широкополосных помех на исследуемые многочастотные СШП системы.
4. Получены экспериментальные характеристики рассматриваемых многочастотных СШП систем радиодоступа при действии АБГШ, многолучевого распространения сигнала, а также при действии узко- и широкополосных помех, спектральная плотность мощности которых превышает спектральную плотность мощности рассматриваемых многочастотных СШП систем радиодоступа на 38 дБ.
5. Получены характеристики помехоустойчивости СШП систем при наличии помехи, представляющей собой сигнал, сформированный по технологии OFDM, при различных долях перекрытия частотных полос полезного СШП сигнала и OFDM помехи. Исследована зависимость помехоустойчивости СШП систем от степени подавления синхросигналов OFDM помехой.
6. Подтверждена возможность совместного использования РЧС многочастотной СШП системой радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов, а также многочастотной СШП системой с дискретными частотными сигналами с современными узкополосными и широкополосными системами радиодоступа при условии, что они перекрывают по спектру не более 30% полосы пропускания СШП систем.
7. Полученные в ходе полунатурного компьютерного эксперимента результаты исследований влияния мощных стационарных узко- и широкополосных помех на характеристики многочастотных СШП систем радиодоступа в условиях многолучевого канала с АБГШ доказывают практическую возможность увеличения относительной эффективности использования спектра до 28,6% при совместном использовании РЧС рассматриваемыми многочастотными СШП системами радиодоступа с существующими системами радиодоступа.

На основании представленных выше положений можно сделать вывод о том, что цель диссертационной работы достигнута, научная задача решена.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. **Фролов, А. А.** Анализ современных стандартов: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a, для применения в СШП – системах / А. А. Фролов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 9. – С. 144-148.
2. **Фролов, А. А.** Сверхширокополосная система радиодоступа с совмещением многочастотной и импульсной технологией / А. А. Фролов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 10. – С. 100-102.
3. **Фролов, А. А.** Влияние узкополосных и широкополосных помех на многочастотную импульсную СШП-систему радиодоступа / А. А. Фролов // Электросвязь. – 2014. – № 7. – С. 32-35.
4. **Фролов, А. А.** Применение сверхширокополосных систем для решения проблемы дефицита РЧС / А. А. Фролов // Вестник связи. – 2012. – № 9. – С. 12-16.
5. Косичкина, Т. П. Когнитивные сверхширокополосные радиосистемы как метод повышения эффективности использования радиочастотного спектра / Т. П. Косичкина, В. С. Сперанский, А. П. Спирын, **А. А. Фролов** и др. // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – № 12. – С. 37-43.
6. **Фролов, А. А.** Исследование и разработка многочастотной сверхширокополосной системы с ДЧ сигналами / А. А. Фролов, Ю. С. Шинаков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – № 6. – С. 28-33.
7. **Фролов, А. А.** Оценка эффективности совместного использования радиочастотного спектра многочастотными сверхширокополосными системами радиодоступа и WIFI / А. А. Фролов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – № 10. – С. 21-26, DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10313.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

8. **Frolov, A.A.** Modeling of Spectrum Sharing Based Multifrequency UWB Radio Access Systems / A. A. Frolov // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia. – 2018, – pp. 1-6. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604389, WOS:000458073700044.

Публикации в других рецензируемых научных журналах и изданиях

9. Сперанский, В. С. Анализ характеристик многочастотных сверхширокополосных систем связи / В. С. Сперанский, **А. А. Фролов** // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Международная науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2011»: материалы конф. – М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭН РАН. – 2011. – часть 3. – С. 64-67.
10. **Фролов, А. А.** Импульсные многочастотные сверхширокополосные системы связи / А. А. Фролов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Международная науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2012»: материалы конф. – М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭН РАН. – 2012. – часть 5. – С. 108-111.
11. Евсигнеев, В. Е. Исследование систем радиодоступа на основе вторичного использования радиочастотного спектра / В. Е. Евсигнеев, А. Ф. Рахматуллин, **А. А. Фролов** // Информационные технологии в мире коммуникаций: Всероссийская науч.-практ. конф.: Материалы конф. – М.: МГУСИ. – 2012. – С. 118-121.
12. Сперанский, В. С. Сложные дискретные частотные сверхширокополосные сигналы / В. С.

- Сперанский, А. А. **Фролов** // Международная науч.-техн. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы инфокоммуникационных технологий»: материалы конф. – М: РНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2014. – Выпуск: LXIX. – С. 78-82.
13. Косичкина, Т. П. Перспективы развития сверхширокополосных систем связи в направлении когнитивного радио / Т. П. Косичкина, В. С. Сперанский, А. П. Спиринов, **А. А. Фролов** и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2015. – Т. 6. – № 1. – С. 9-11.
14. **Фролов, А. А.** Сравнительный анализ сверхширокополосных и широкополосных систем связи / А.А. Фролов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Международная науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2013»: материалы конф. – М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭН РАН. – 2013. – часть 4. – С. 104-108.
15. **Фролов, А. А.** Исследование многочастотной сверхширокополосной системы радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов / А. А. Фролов // Радиоэлектронные устройства и системы инфокоммуникационных технологий: Международная науч.-техн. конф.: материалы конф. – М.:РНТОРЭС им. А.С. Попова. – 2017. – Выпуск :LXXII. – С. 77-83.
16. **Фролов, А. А.** Возможность применения многочастотных сверхширокополосных систем в системах ближней локации / А. А. Фролов // Телекоммуникационные и вычислительные системы: Международная науч.-техн. конф. «МФИ-2013»: материалы конф. – М.: МТУСИ. – 2013. – С. 208-209.
17. **Фролов, А. А.** Формирователь сверхширокополосных сигналов с OFDM / А. А. Фролов // Цифровые технологии радиосвязи и телерадиовещания: Науч.-техн. конф.: материалы конф. – М.: МТУСИ. – 2011. – С. 45.
18. **Фролов, А. А.** Исследование влияния помех на многочастотную сверхширокополосную систему радиодоступа с совмещением технологий OFDM и кодового разделения абонентов / А. А. Фролов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Международная науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2015»: материалы конф. – М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭН РАН. – 2015. – часть 5. – С. 42-47.
19. Косичкина, Т. П. Исследование многочастотных СШП систем радиодоступа на основе совместного использования радиочастотного спектра / Т. П. Косичкина, В. С. Сперанский, **А. А. Фролов** и др. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Международная науч.-тех. конф. «INTERMATIC – 2018»: материалы конф. – М.: МГТУ МИРЭА - ИРЭН РАН. –2018. – Т. 18. – № 4. – С. 861-866.

Отчеты НИР

20. Исследование возможности применения СШП систем как вариант решения проблемы дефицита РЧС: отчет о НИР / Сперанский В. С., **Фролов А. А.** Инв.№ 02201450090, Рег.№ 01201450011, 2012. – 57 с.
21. Исследование особенностей применения различных методов модуляции в многочастотных сверхширокополосных системах радиодоступа: отчет о НИР / **Фролов А. А.** Инв.№ 02201459198, Рег.№ 01201464658, 2013. – 61 с.

Подписано в печать 25.09.2020.

Формат 29,7x42/8. Усл.печ.л. 1 Тираж 100 экз. Заказ 214

Оперативная полиграфия «Брис – М»

111024, Москва, ул. Авиамоторная, д.8 стр.1 www.брис-м.рф