

На правах рукописи



ГРАХОВА Елизавета Павловна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2016

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Багманов Валерий Хусаинович,
профессор каф. телекоммуникационных си-
стем ФГБОУ ВО «Уфимский государствен-
ный авиационный технический университет»

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, доцент
Козлов Сергей Владимирович,
профессор каф. радиоэлектронных и телеком-
муникационных систем ФГБОУ ВО «Казан-
ский национальный исследовательский техни-
ческий университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

д-р техн. наук
Коровин Валерий Михайлович,
старший научный сотрудник, главный геофизи-
к ОАО «Башнефтегеофизика»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информ-
матики», г. Самара**

Защита диссертации состоится 14 октября 2016 г. в 10⁰⁰ часов на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.288.07 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский гос-
ударственный авиационный технический университет» по адресу: 450008,
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфим-
ский государственный авиационный технический университет» и на сайте
www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В качестве эффективного технического решения реализации каналов беспроводного доступа в условиях увеличения трафика, а также повышения требований к скоростям передачи данных, вызванных развитием мультимедийных технологий, видится использование сверхширокополосных (СШП) систем связи. Значительный потенциал эксплуатации данных систем заключается в ряде существенных преимуществ над традиционными технологиями широкополосного доступа, в том числе высоких показателях помехоустойчивости, защищенности связи от перехвата и проникающей способности сигнала.

Однако ввиду сверхширокого диапазона рабочих частот возникает проблема в обеспечении электромагнитной совместимости СШП систем связи с другими радиослужбами. В 2002 году Федеральное агентство по связи США (FCC – Federal Communications Commission) представило ограничения на эффективную изотропную излучаемую мощность (ЭИИМ) СШП устройств, определенные через спектральную маску. В связи с введением ограничений на уровень излучаемой мощности возникают проблемы в создании СШП систем связи в условиях регулирования FCC, заключающиеся в невысокой эффективности реализации потенциальных возможностей данных систем, например, малой дальности беспроводного действия.

Введение в РФ собственного регулирования СШП систем связи привело к невозможности законного применения всех зарубежных разработок в области СШП связи и устройств. Сложная спектральная форма маски, определенная Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) в 2009 году, накладывает более серьезные требования на формирование СШП сигнала, чем в случае маски FCC. Данное обстоятельство, а также низкий уровень разрешенной излучаемой мощности приводят к дальнейшему уменьшению показателей эффективности, дальности действия и скорости передачи СШП систем связи.

В научной литературе на сегодняшний день отсутствуют готовые решения методов повышения эффективности СШП беспроводных систем связи, работающих в условиях ограничений спектральной маски ГКРЧ. Таким образом, разработка подобных методов является актуальным и перспективным направлением развития технологии СШП связи в РФ.

Степень разработанности темы. Основным методом повышения эффективности СШП систем связи является модуляция данных радиоимпульсами, характеризующимися максимизацией мощности в пределах ограничений спектральной маски. Исследованиям в области моделирования СШП радиоимпульсов, спектральная плотность мощности (СПМ) которых удовлетворяет ограничениям маски FCC, посвящены работы таких ученых как: Абдрахманова Г.И., Pora A., Hu J., Liao S., Jia Z., Keshavarz S.N., Cai C., Premkumar A.B., Menon M., Parr B., Xia B., Zhang N., Campos M., Mishra S., Biagi M., Xiaolin Shi, Jang W.M., Ling H., Molish A.F., Davidson T., и многих других. Согласно большинству работ, наиболее распространенным методом формирования СШП радиоимпульса является использование линейных комбинаций импульса Гаусса

(ИГ) и его производных. Однако для достижения больших показателей соответствия СПМ радиоимпульсов спектральной маске необходимо использование значительного количества производных ИГ высоких порядков, отличающихся сложностью технической реализации.

Экспериментальные исследования по генерации и высокоскоростной передаче СШП радиоимпульсов были представлены такими учеными как: Wang C., Dong J., Abtahi M., Wan Q., LaRochelle S., Hanawa M., Tan C.M., Shams H., Gibbon T.B., Rodes R., Jensen J.B., Monroy I.T. В основе данных работ лежит применение СШП связи для организации сетей широкополосного доступа, работающих по технологии «Радио по волокну». Результаты экспериментов продемонстрировали невысокие показатели дальности беспроводного действия СШП систем связи, ввиду использования радиоимпульсов простой формы на основе пятой производной ИГ, а также амплитудной манипуляции, характеризующейся наличием спектральных пиков в формируемом сигнале, приводящих к необходимости уменьшения излучаемой мощности.

Объектом исследования являются беспроводные СШП системы связи, характеризующиеся регламентируемым уровнем допустимой ЭИИМ, согласно ограничениям спектральной маски ГКРЧ.

Предметом исследования являются методы повышения эффективности высокоскоростной передачи данных для СШП беспроводных систем связи.

Целью работы является повышение эффективности СШП беспроводных систем связи за счет спектральной модуляции сигнала на основе манипулирования частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ, а также параметрической оптимизации формы радиоимпульсов.

Задачи исследования:

1. Разработка метода спектральной модуляции на основе параметрической оптимизации формы радиоимпульсов в условиях ограничений уровня излучаемой мощности, обеспечивающего повышение энергетической эффективности СШП системы связи.
2. Разработка методики согласования формы радиоимпульса с характеристиками излучающего СШП устройства и скоростью передачи данных в канале связи.
3. Разработка метода спектральной модуляции на основе частотного манипулирования СШП сигнала с использованием частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ.
4. Разработка метода демодуляции СШП сигнала на основе спектрального анализа символов, позволяющего без увеличения мощности передаваемого сигнала снизить вероятность ошибки.

Научная новизна работы:

1. *Разработан метод повышения энергетической эффективности СШП системы связи, основанный на параметрической оптимизации формы радиоимпульсов, отличающийся использованием доминирующей триады в спектральном представлении сигнала, позволяющий увеличить дальность действия системы связи в условиях ограниченного отношения сигнал/шум.*

2. *Разработана* методика согласования формы радиоимпульса с характеристиками излучающего СШП устройства, *отличающаяся* возможностью адаптации формы радиоимпульса к битовой скорости передачи данных в канале и *позволяющая* повысить спектральную эффективность системы связи.

3. *Разработан* метод спектральной модуляции СШП сигнала, *основанный* на частотном манипулировании, *отличающийся* использованием скачкообразной перестройки частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ и *позволяющий* увеличить энергетическую эффективность канала связи.

4. *Разработан* метод демодуляции СШП сигнала, *основанный* на спектральном анализе сигнала, *отличающийся* кодированием символов сообщения с помощью разнесения их по непересекающимся частотным интервалам внутри маски ГКРЧ и *позволяющий* снизить вероятность ошибки без увеличения мощности передаваемого сигнала.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов исследования для проектирования СШП систем связи, отвечающих ограничениям, установленным в РФ. Применение метода спектральной модуляции сигнала на основе параметрической оптимизации формы радиоимпульса, согласованной с характеристиками излучающего устройства и скоростью передачи данных в канале, позволит увеличить дальность беспроводного действия СШП систем связи при сохранении баланса между высокими показателями энергетической и спектральной эффективности. Предложенный метод спектральной модуляции СШП сигнала на основе частотного манипулирования снижает вероятность ошибки при приеме, создает запас отношения сигнал-шум, который может быть использован для увеличения дальности связи или повышения скорости передачи данных. Разработаны алгоритмы и программы формирования, цифровой обработки, модуляции и демодуляции СШП сигнала. Предложена аппаратная реализация СШП канала связи на основе экспериментальной установки.

Работа поддержана грантом, предоставленным Министерством высшего образования и науки Датского Королевства, в рамках соглашения о сотрудничестве с правительством РФ в области культуры, науки и образования, на проведение экспериментального исследования на базе лаборатории «Системы связи городского доступа и малого покрытия» факультета Фотоники Датского Технического Университета, г. Люнгбю, Дания.

Материалы диссертационной работы применены при выполнении соглашения о предоставлении субсидии №14.574.21.0058, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0058, по теме «Повышение эффективности систем широкополосного доступа к мультимедийным услугам, работающих по технологии Radio-over-Fiber (RoF), на основе совершенствования элементов и устройств физического уровня» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы».

Методология и методы исследования. Результаты работы получены на основе использования основных положений теории цифровой и электрической связи, теории случайных процессов, теории спектрального анализа сигнала,

теории цифровой обработки сигнала и численных методов. Применены методы математического и имитационного моделирования, в том числе программирования. На основе разработанных имитационных моделей проведены реальные экспериментальные исследования.

Положения выносимые на защиту:

1. Метод повышения энергетической эффективности СШП системы связи на основе параметрической оптимизации формы радиоимпульсов.
2. Методика согласования формы радиоимпульса с характеристиками СШП излучающего устройства с возможностью адаптации формы радиоимпульса к битовой скорости передачи данных в канале.
3. Метод спектральной модуляции СШП сигнала на основе частотного манипулирования со скачкообразной перестройкой частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ.
4. Метод демодуляции, основанный на спектральном анализе сигнала, с применением кодирования символов сообщения с помощью разнесения их по непересекающимся частотным интервалам внутри маски ГКРЧ.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации базируется на использовании известных теоретических положений и методов исследования. Корректность используемых математических моделей и их адекватность реальным физическим процессам подтверждается данными проведенных численных и реальных экспериментов.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационной работы обсуждались на VIII - IX Всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых, г. Уфа, 2013-2014; VIII Всероссийской молодёжной научной конференции «Мавлютовские чтения», г. Уфа, 2014; вузовском туре программы «У.М.Н.И.К.», г. Уфа, 2014; XV и XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», г. Казань, 2014, г. Уфа, 2015; XIII Международной научно-технической конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях», г. Уфа, 2015; V Всероссийской научной конференции «Армандовские чтения», г. Муром, 2015; научно-технических встречах в Датском Техническом Университете (г. Люнгбю, Дания) и Политехническом Университете Валенсии (г. Валенсия, Испания), 2015-2016; а также на семинарах кафедры телекоммуникационных систем УГАТУ, г. Уфа, 2012-2016.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 14 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 2 статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, 8 докладов в сборниках трудов международных и российских конференций.

Личный вклад. Научным руководителем была осуществлена постановка главных задач исследования. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. Самостоятельно автором были разработаны: алгоритмы предложенных методов повышения эффективности СШП систем связи; имитационные модели, реализующие предложенные методы. Также самостоятельно проведено имитационное моделирование, собрана экспериментальная установка

и проведено экспериментальное исследование. Самостоятельно были обработаны результаты экспериментов. Научный руководитель принимал участие в обсуждении результатов, на основе чего опубликованы статьи в соавторстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 197 с. машинописного текста, 99 рисунков, список использованной литературы из 90 наименований, приложений на 14 с.

Благодарности. Автор выражает благодарность кандидату технических наук И.К. Мешкову за помощь и поддержку, оказанную в процессе выполнения работы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулирована основная цель исследования, обоснованы его научная новизна и актуальность, приведены основные положения выносимые на защиту.

В первой главе проанализирована технология СШП связи, основанная на передаче радиоимпульсов, определены методы формирования СШП сигнала и проблемы, возникающие в условиях реальной эксплуатации данных систем связи. Приведен краткий обзор подходов и методов, применяемых в СШП системах связи для повышения эффективности высокоскоростной передачи данных, в том числе увеличения дальности связи. Таким образом, обоснована актуальность темы исследования, а также сформулированы основные задачи.

Во второй главе представлен метод спектральной модуляции СШП сигнала на основе параметрической оптимизации формы радиоимпульса. Оптимизация осуществляется методом наименьших квадратов (МНК), который заключается в минимизации суммы квадратов отклонения оптимизируемой функции (в данном случае функции СПМ радиоимпульса – $P_{\text{РИ}}$) от целевой (в данном случае функции ЭИИМ маски ГКРЧ – $P_{\text{ГКРЧ}}$):

$$F_{\text{opt}} = \int_{f_n}^{f_b} |P_{\text{ГКРЧ}}(f) - P_{\text{РИ}}(f, x)|^2 df \rightarrow \min_x, \text{ при } P_{\text{РИ}}(f) \leq P_{\text{ГКРЧ}}(f), \quad (1)$$

где err – разница уровней СПМ радиоимпульса и ЭИИМ спектральной маски;

x – набор оптимизируемых параметров радиоимпульса.

Первоначально разработаны модели оптимального радиоимпульса простой формы, базирующиеся на функциях Гаусса, Рэлея, Эрмита и вейвлетов. Данные решения являются наиболее распространенными при формировании СШП радиоимпульса в случае спектральной маски FCC.

Временные выражения для ИГ и импульса Рэлея (ИР) имеют вид:

$$s_{\text{ИГ}}(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \quad s_{\text{ИР}}(t) = \frac{4\pi t}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где σ – коэффициент формы.

Модели оптимального СШП радиоимпульса для ИГ и ИР представлены линейной комбинацией двух подимпульсов с рассчитанными весовыми коэф-

фициентами – w . Нормированные СПМ разработанных моделей оптимального радиоимпульса на основе ИГ и ИР представлены на рис. 1 а-б.

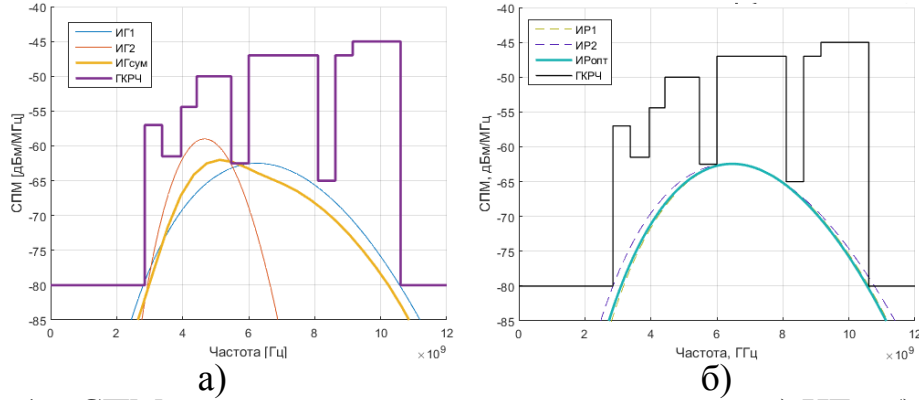


Рис. 1 – СПМ моделей радиоимпульсов на основе: а) ИГ_Σ; б) ИР_Σ

Параметры подимпульсов ИГ₁ и ИГ₂, ИР₁ и ИР₂ соответственно равны: порядок производной – $n = [5; 15; 5; 4]$, $\sigma = [0,056; 0,131; 0,211; 0,197]$ нс, $w = [0,6; 0,3; 0,4; 0,15]$.

Далее формирование оптимального радиоимпульса осуществляется на основе функций модулированных эрмитовских импульсов (МдЭИ), а также частотного В-сплайнового вейвлета (ЧБСВ). Временные выражения для МдЭИ и ЧБСВ представлены как:

$$s_{ЭРМ} = (-\sigma)^n \exp\left(\frac{t^2}{\sigma^2}\right) \frac{d^n}{dt^n} \exp\left(-\frac{t^2}{\sigma^2}\right) \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (3)$$

$$s_{ЧБСВ}(t) = \text{Im} \left[\sqrt{\mu f_0} \left(\text{sinc}\left(\frac{\mu f_0 t}{m}\right) \right)^m \exp(i 2 \pi f_0 t) \right], \quad (4)$$

где n – порядок полинома МдЭИ; ω_0 – угловая частота; ϕ_0 – фаза, f_0 – центральная частота ЧБСВ; m – коэффициент формы, $m \in \mathbb{N}$; μ – показатель широкополосности.

Оптимальный радиоимпульс на основе МдЭИ представляет собой МдЭИ первого порядка, СПМ которого представлена на рис. 2 а. Параметры данного радиоимпульса соответствуют значениям: $n = 1$, $\sigma = 0,0393$ нс, $f_0 = 3,23$ ГГц, $\phi_0 = 3,1$ рад. Модель оптимального радиоимпульса на основе ЧБСВ сформирована как сумма двух подимпульсов ЧБСВ₁ и ЧБСВ₂ с параметрами: $\mu = [5,3; 3]$; $f_0 = [4,7; 7,175]$ ГГц; $m = [5; 4]$; $w = [1; 0,5]$. СПМ оптимального радиоимпульса на основе ЧБСВ приведена на рис. 2 б.

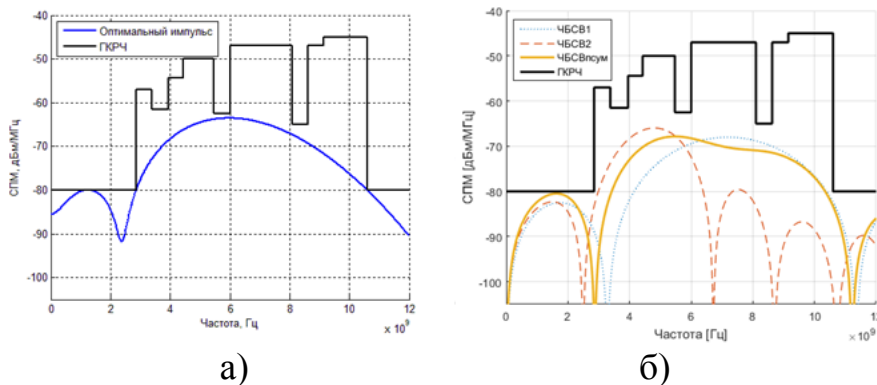


Рис. 2 – СПМ моделей радиоимпульсов на основе: а) МдЭИ; б) ЧБСВ_{пΣ}

Наличие провалов в ЭИИМ маски ГКРЧ делает невозможным формирование радиоимпульса простой формы с максимально разрешенным уровнем СПМ при использовании всего диапазона частот. Из этого следует, что применение данного подхода не является достаточно эффективным.

Решение задачи максимизации разрешенной мощности радиоимпульса видится в использовании линейной комбинации подимпульсов, как минимум три из которых реализованы в пределах частотных окон, образующих доминирующую триаду спектрального представления маски ГКРЧ.

Первая модель оптимального радиоимпульса сложной формы, разработанная на основе данного подхода, также базируется на функции ЧБСВ и представлена суммой трех подимпульсов с параметрами: $\mu = [0,15; 0,25; 0,15]$, $f_0 = [4,8; 7,05; 9,6]$ ГГц, $m = 1$, $w = [0,55; 0,99; 0,9]$. СПМ данной модели представлена на рис. 3 а.

Базовой функцией, на основе которой разработана вторая модель оптимального радиоимпульса сложной формы, является функция типа корень из «приподнятого косинуса», или импульс Найквиста (ИН). Модель оптимального радиоимпульса на основе ИН представляет собой сумму четырех подимпульсов, характеризующихся общим значением коэффициента скругления спектра – α . Параметры данных подимпульсов: $f_v = [10,6; 5,47; 8,1; 10,6]$ ГГц, $f_n = [2,85; 3,95; 6; 8,625]$ ГГц; $\alpha = 0,5$. СПМ модели оптимального радиоимпульса на основе ИН представлена на рис. 3 б, а выражение для временной формы подимпульса в сумме имеет вид:

$$s_{\text{ИН}}(t) = \frac{2}{T_i} \text{sinc}(\pi t / T_i) \frac{\cos(\pi \alpha t / T_i)}{1 - 4\alpha^2 t^2 / T_i^2} \cos(2\pi c_i t), \quad (5)$$

где T_i – время пересечения нулевого уровня, а c – центральная частота.

Третья модель оптимального радиоимпульса сложной формы, реализованная на базе функции квадратичного гиперболического секанса, лежащей в основе импульсов типа оптических солитонов (ОС), представлена суммой трех подимпульсов с параметрами: коэффициент широкополосности – $\sigma = [0,9; 2,5; 1,6]$ нс, $f_0 = [4,7875; 7,05; 9,6125]$ ГГц, $w = [0,3; 0,7; 1]$. СПМ данной модели представлена на рис. 3 в. Выражение для временной формы ОС:

$$s_{\text{ОС}}(t) = \text{sech}^2\left(\frac{t - t_0}{\sigma}\right). \quad (6)$$

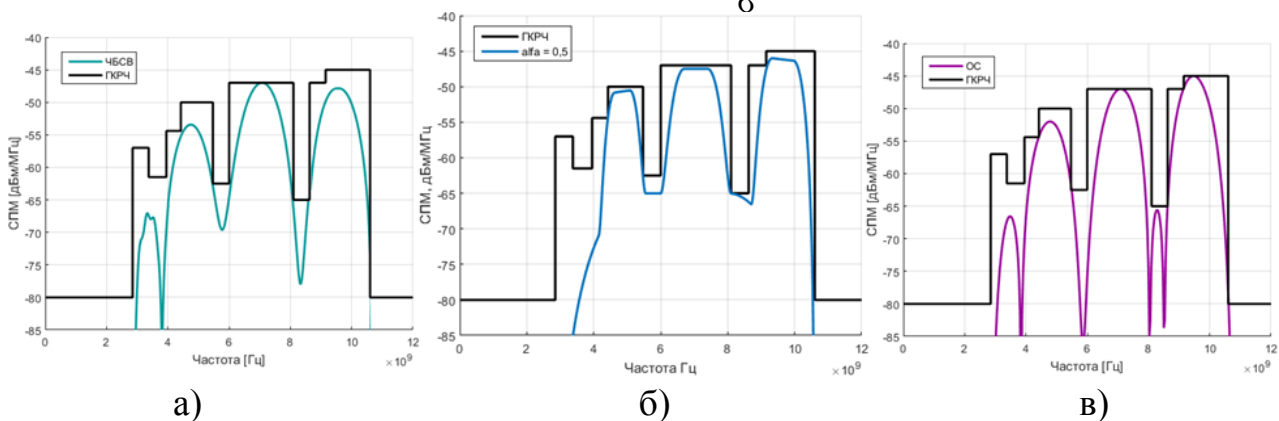


Рис. 3 – СПМ моделей оптимального радиоимпульса сложной формы:
а) ЧБСВ; б) ИН; в) ОС

В соответствии с целью исследования, эффективность разработанных моделей оптимального СШП радиоимпульса оценивается на основе коэффициента эффективности использования маски (КЭИМ) ГКРЧ (таблица 1), рассчитанного по формуле:

$$\alpha_{\text{ЭИМ}} = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} P_{\text{РИ}}(f) df / \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} P_{\text{ГКРЧ}}(f) df. \quad (7)$$

Таблица 1 – КЭИМ и $S_{\text{РИ}}$ для предложенных моделей оптимальных СШП радиоимпульсов

Название модели	Маска ГРЧ	ИГ _Σ	ИР _Σ	МдЭИ	ЧБСВ _{пΣ}	ЧБСВ	ИН	ОС
$\alpha_{\text{ЭИМ}}$	1	0,4	0,35	0,33	0,26	0,75	0,70	0,72
$S_{\text{РИ}}$, мВт	0,112	0,045	0,039	0,037	0,029	0,084	0,078	0,081
$S_{\text{РИ}}$, дБм	-9,5	-13,47	-14,09	-14,32	-15,38	-10,76	-11,08	-10,92

Из результатов оценки следует, что все предложенные модели СШП радиоимпульса сложной формы характеризуются показателем КЭИМ, существенно превышающим показатель для радиоимпульсов простой формы. Наибольший показатель КЭИМ относится к модели ЧБСВ и составляет 0,75, а среди моделей простой формы – к ИГ_Σ и составляет 0,40. Соответственно, применение моделей радиоимпульсов сложной формы приводит к увеличению КЭИМ как минимум в 1,9 раз.

В условиях реальной эксплуатации оптимальная форма радиоимпульсов может искажаться и переставать отвечать ограничениям ввиду двух основных факторов: при изменении скорости передачи данных в канале изменяется количество выборок генератора сигнала, необходимое для описания одного радиоимпульса, приводя к искажению формы его СПМ; ГРЧ ограничивает ЭИИМ передаваемого СШП сигнала, являющуюся функцией СПМ радиоимпульса и коэффициента усиления (КУ) излучающего устройства. В виду нелинейности КУ в рабочем диапазоне частот, форма ЭИИМ радиоимпульса отличается от формы СПМ.

Решением данной проблемы является разработка методики согласования формы СШП радиоимпульса с характеристиками излучающего устройства, а также скоростью передачи данных в канале – R . Для адаптации к заданному значению R в канале, функция оптимизации вычисляет необходимое количество отсчетов генератора сигнала (N_{sa}) и определяет оптимальные параметры модели, максимизирующие КЭИМ в текущих условиях, согласно:

$$F_{\text{opt2}} = \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} |(P_{\text{ГКРЧэф}}(f) - P_{\text{РИ}}(f, N_{sa}, x)|^2 df \rightarrow \min_x, \text{ при } P_{\text{РИ}}(f, N_{sa}) \leq P_{\text{ГКРЧ}}(f). \quad (8)$$

Для согласования формы СПМ моделей радиоимпульса с частотными характеристиками излучающего устройства, в качестве целевой функции оптимизации используется эффективная спектральная маска ГРЧ – $P_{\text{ГКРЧэф}}$:

$$P_{\text{ГКРЧэф}}(f) = P_{\text{ГКРЧ}}(f)[\text{дБм}] - G_{\text{прд}}(f), [\text{дБи}], \quad (9)$$

где $G_{\text{прд}}$ – КУ передающей антенны.

Расчет эффективной спектральной маски ГКРЧ представлен на рис. 4 а. Пример работы предложенной методики согласования на основе модели ЧБСВ для трех различных значений R приведен на рис. 4 б.

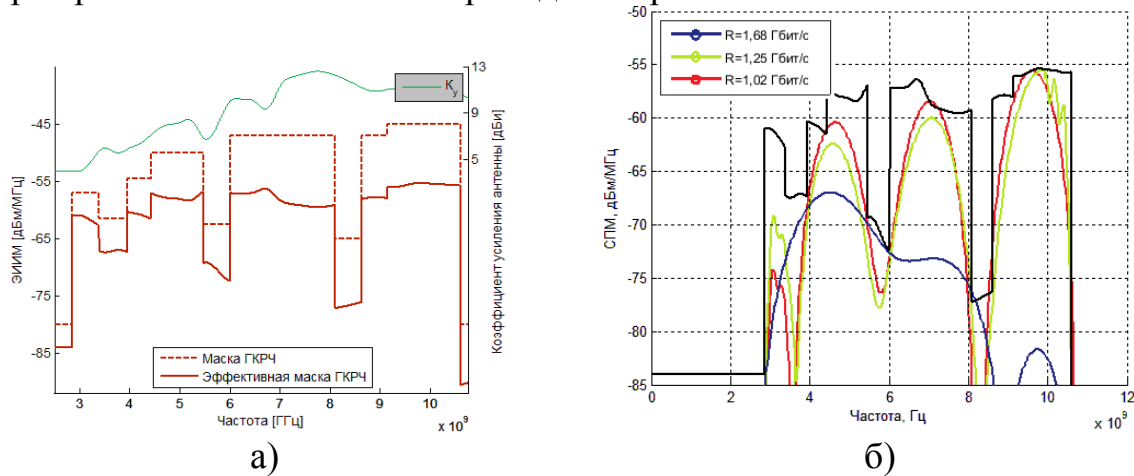


Рис. 4 – Представленная методика: а) расчет эффективной спектральной маски ГКРЧ; б) пример работы методики

Согласно рис. 4 б, форма СПМ радиоимпульса ЧБСВ различается для трех значений R , однако во всех случаях она отвечает ограничениям $P_{\text{ГКРЧэф}}$, а также характеризуется наибольшим КЭИМ, возможным в данных условиях.

Оценка эффективности разработанных моделей оптимального радиоимпульса произведена по коэффициентам спектральной эффективности (КСЭ), энергетической эффективности (КЭЭ), а также на основе зависимостей коэффициента битовых ошибок (BER) от отношения сигнал/шум (SNR) в канале. Для этой цели разработаны имитационные модели (ИМ) частей СШП системы связи в среде моделирования Matlab, выполняющие следующие функции:

1) формирование СШП сигнала на основе разработанных моделей радиоимпульсов. Данная задача решается с помощью ИМ_ПРД, включающей в себя функции формирования информационной последовательности, расчета оптимальных параметров моделей СШП радиоимпульсов, спектральной модуляции данных рассчитанными радиоимпульсами. ИМ_ПРД также используется в экспериментальном исследовании, представленном в главе 4;

2) вычисление BER. Данная задача решается на основе ИМ_ПРМ, включающей в себя функции согласованной фильтрации, демодуляции, а также цифровой обработки сигнала для вычисления BER. ИМ_ПРМ также используется в экспериментальном исследовании;

3) имитация канала связи, реализованного на базе ИМ_КС.

На основе разработанных ИМ было произведено 275 циклов имитационного моделирования. Показателей BER оценивались для 25 различных значений SNR в канале связи, трех значений R , а также для четырех предложенных моделей оптимального СШП радиоимпульса: ЧБСВ, ИН, ОС и ИГ_Σ. Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 5 а-г.

Все кривые BER находятся под прямой уровня кодирования с исправлением ошибок (FEC) даже для значений SNR близких к нулю, что подразумевает безошибочную работу данных СШП систем связи при использовании FEC в

любых условиях беспроводной передачи. Без использования помехоустойчивого кодирования все модели СШП радиоимпульса сложной формы обеспечивают безошибочную передачу уже при значениях SNR меньше десяти.

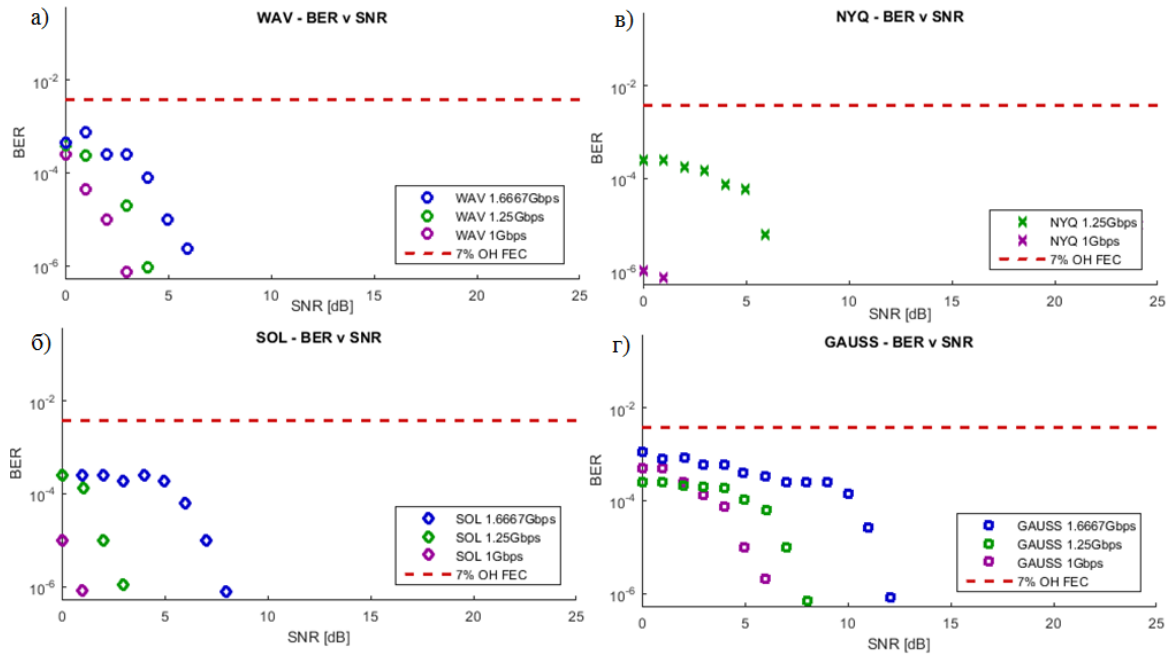


Рис. 5 – Зависимость BER от SNR для: а) ЧБСВ, б) ОС, в) ИН, г) ИГ_Σ

Согласно полученным результатам, наибольшей потенциальной помехоустойчивостью характеризуется модель ИН при $R_1 = 1$ Гбит/с, наименьшей – модель ИГ_Σ при $R_3 = 1,67$ Гбит/с. Для средней скорости передачи ($R_2 = 1,25$ Гбит/с) наилучшим образом показали себя модели на основе ОС и ЧБСВ. Для значений SNR в канале, при которых обеспечивается безошибочная передача ($SNR_{пор}$), рассчитаны показатели КСЭ и КЭЭ, согласно (10), представленные в таблицах 2 и 3 соответственно.

$$\gamma_p = R / \left(\Delta F \left(1 + \frac{1}{\alpha_{ЭИМ}} \right) \right), \quad \beta = \gamma_p \left(1 + \frac{1}{\alpha_{ЭИМ}} \right) / SNR. \quad (10)$$

Таблица 2 – КСЭ для исследуемых моделей радиоимпульсов

	R_1	R_2	R_3
ЧБСВ	0,055	0,066	0,057
ИН	0,053	0,065	-
ОС	0,054	0,062	0,056
ИГ _Σ	0,037	0,042	0,061

Таблица 3 – КЭЭ для исследуемых моделей радиоимпульсов

	R_1	R_2	R_3
ЧБСВ	0,065	0,064	0,043
ИН	0,102	0,032	-
ОС	0,102	0,081	0,034
ИГ _Σ	0,026	0,026	0,014

Наибольшие показатели КСЭ соответствуют моделям оптимального радиоимпульса сложной формы при R_2 , которые при несущественных потерях в КЭИМ демонстрируют увеличение скорости безошибочной передачи на 25%. Максимальный показатель КСЭ составляет 0,066 и относится к модели ЧБСВ, что в 1,5 раза больше, чем у модели ИГ_Σ при том же значении R .

Наибольший показатель КЭЭ относится к моделям ИН и ОС при R_1 и составляет 0,102. Данное значение почти в четыре раза превышает КЭЭ для ИГ_Σ в тех же условиях. Очевидно, что разработанные модели оптимального

СШП радиоимпульса сложной формы позволяют увеличить энергетическую эффективность канала связи в 2,5 - 4 раза, по сравнению с моделями радиоимпульса простой формы.

Третья глава посвящена разработке метода спектральной модуляции СШП сигнала на основе частотного манипулирования со скачкообразной перестройкой частотных полос в пределах маски ГКРЧ. Алгоритм представленного метода модуляции функционирует следующим образом.

Для увеличения помехоустойчивости осуществляется сверточное кодирование сигнала с внесением памяти. Пусть $a(i)$ – информационная последовательность бит, а $s(j)$ – сигнал на выходе кодера, $m = [m_1 \ m_2]$ – вектор начальных состояний, $n = [n_1 \ n_2]$ – вспомогательный вектор. В начале цикла кодирования m_1, m_2, n_1, n_2 равны нулю, тогда: $n(1) = a(i) \wedge m(2)$; $n(2) = a(i) \wedge \neg m(2)$; $s(j) = \neg a(i) \wedge m(2)$; $s(j+1) = a(i) \wedge m(2)$; $m(1) = n(1)$; $m(2) = n(2)$.

Модулирующие радиоимпульсы формируются на основе импульса ОС, путем скачкообразного изменения его центральной частоты c_i . Параметры модулирующих радиоимпульсов: $\sigma = 4$, $c_i = [4,7875; 7,05; 9,6125]$ ГГц.

Данный метод предоставляет четыре возможные позиции для модуляции данных. При этом выявлено, что использованная схема помехоустойчивого кодирования формирует битовую последовательность, в которой не встречается комбинация бит «11». В результате, сигнал на выходе кодера характеризуется наличием всего четырех возможных комбинаций трех бит: «000», «001», «010», «100». Следовательно, возможно увеличение размера одного символа до трех бит, а битовой скорости в три раза.

Сигнал на выходе кодера модулируется, согласно следующей разработанной схеме кодирования символов сообщения с помощью разнесения их по непересекающимся частотным интервалам внутри маски ГКРЧ:

- если $s(j)=0$, $s(j+1)=0$ и $s(j+2)=0$, то на выходе модулятора передается ноль длительностью N_{sa} ;
- если $s(j)=0$, $s(j+1)=0$ и $s(j+2)=1$, то на выходе модулятора формируется радиоимпульс ОС с c_1 и длительностью N_{sa} ;
- если $s(j)=0$, $s(j+1)=1$ и $s(j+2)=0$, то на выходе модулятора формируется радиоимпульс ОС с c_2 и длительностью N_{sa} ;
- если $s(j)=1$, $s(j+1)=0$ и $s(j+2)=0$, то на выходе модулятора формируется радиоимпульс ОС с c_3 и длительностью N_{sa} .

Для предложенного метода спектральной модуляции СШП сигнала также разработан метод демодуляции, основанный на спектральном анализе сигнала. Алгоритм данного метода демодуляции осуществляется следующим образом.

Принятый сигнал последовательно разбивается на символы с длительностью, равной N_{sa} . Для каждого фрагмента принятого сигнала, соответствующего одному символу, осуществляется прямое преобразование Фурье, находятся значения максимума спектра ($S_{y\max}$) и частоты, соответствующей данному максимуму.

На основе порогового уровня максимума спектра принятых символов осуществляется детектирование символов «000» и их позиций в принятом сигнале. Так, если $S_{\text{ymax}}(i) < S_{\text{пор0}}$, то $s_{\text{temp}}(i) = 0$, где $s_{\text{temp}}(i)$ – сигнал на выходе демодулятора. Значения частот f_{max} , соответствующие данным символам, считаются найденными и в дальнейшей демодуляции не принимают участия.

Для оставшихся значений $f_{\text{max}i}$ производится распознавание радиоимпульсов по четырем значениям пороговых частот: $f_{\text{пор1}}=c_1/2$, $f_{\text{пор2}}=(c_1+c_2)/2$; $f_{\text{пор3}}=(c_2+c_3)/2$; $f_{\text{пор4}}=c_3+2e^9$. Таким образом: если $f_{\text{пор1}} \leq f_{\text{max}}(i) < f_{\text{пор2}}$, то $s_{\text{temp}}(i) = 1$; если $f_{\text{пор2}} \leq f_{\text{max}}(i) < f_{\text{пор3}}$, то $s_{\text{temp}}(i) = 2$; если $f_{\text{пор3}} \leq f_{\text{max}}(i) < f_{\text{пор4}}$, то $s_{\text{temp}}(i) = 3$. Значения «1», «2» и «3» говорят о детектировании ОС₁, ОС₂ и ОС₃ соответственно.

В конце цикла демодуляции осуществляется восстановление кодированной последовательности бит $s'(j)$ по вспомогательному вектору $s_{\text{temp}}(i)$ следующим образом:

- если $s_{\text{temp}}(i) = 0$, то $s'(j) = 0$, $s'(j+1) = 0$, $s'(j+2) = 0$;
- если $s_{\text{temp}}(i) = 1$, то $s'(j) = 0$, $s'(j+1) = 0$, $s'(j+2) = 1$;
- если $s_{\text{temp}}(i) = 2$, то $s'(j) = 0$, $s'(j+1) = 1$, $s'(j+2) = 0$;
- если $s_{\text{temp}}(i) = 3$, то $s'(j) = 1$, $s'(j+1) = 0$, $s'(j+2) = 0$.

По завершению цикла демодуляции осуществляется декодирование последовательности $s'(j)$. Пусть $a'(i)$ – декодированная последовательность информационных бит. Тогда: $a'(i) = s'(j+1) \vee s'(j+2) \vee s'(j+3)$.

Для оценки эффективности предложенных методов модуляции и демодуляции также проведено имитационное моделирование, для чего разработаны ИМ выполняющие функции, аналогичные представленным в главе 2. В сумме проведено 150 циклов оценки BER для шести различных значений R . Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 6.

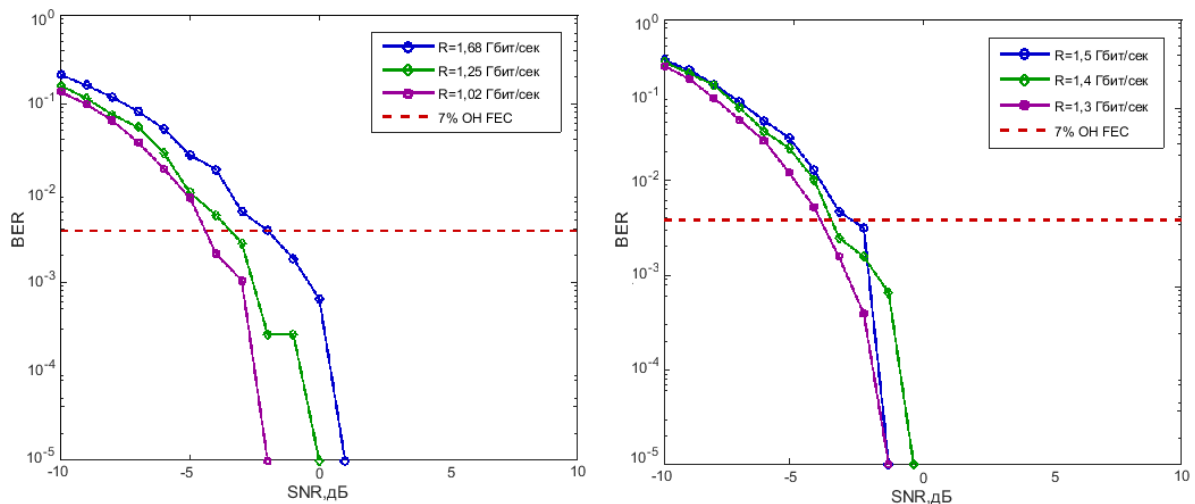


Рис. 6 – Зависимость BER от SNR

При сравнении результатов имитационного моделирования для разработанных методов спектральной модуляции выявлено, что метод на основе частотного манипулирования обеспечивает следующий выигрыш: для R_1 порог безошибочной передачи меньше в среднем на 3 дБ, при R_2 – на 5 дБ, а при R_3 – на 6 дБ. Таким образом, снижается вероятность ошибки при приеме сигнала.

Так при R_1 вероятность ошибки для метода спектральной модуляции на основе оптимальных радиоимпульсов составляет $8 \cdot 10^{-5}$; для $R_2 - 2 \cdot 10^{-4}$; а при $R_3 - 10^{-3}$, а для метода, представленного в данной главе – 10^{-6} .

Таблица 4 – КСЭ и КЭЭ для метода модуляции

R	γ_p	β
1,02 Гбит/с	0,024	0,204
1,25 Гбит/с	0,030	0,161
1,68 Гбит/с	0,040	0,171
1,3 Гбит/с	0,031	0,211
1,4 Гбит/с	0,033	0,228
1,5 Гбит/с	0,036	0,194

Согласно формулам (10), также оценивались КСЭ и КЭЭ (таблица 4). На основе полученных результатов можно сделать вывод, что данный метод спектральной модуляции позволяет увеличить КЭЭ канала связи в 2,4 – 3,9 раз, по сравнению с методом, представленным в главе 2, уступая при этом в КСЭ в 1,5- 2,2 раза.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования высокоскоростной передачи данных на основе разработанных моделей оптимального радиоимпульса в реальных линиях связи.

Эксперимент проводился на базе лаборатории «Системы связи городского доступа и малого покрытия» факультета Фотоники Датского Технического Университета, г. Люнгбю, Дания. Экспериментальная установка была организована, согласно структурной схеме, представленной на рис. 7.

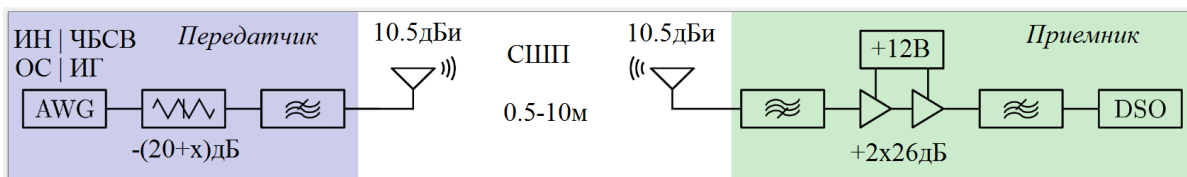


Рис. 7 – Структурная схема экспериментальной установки

В результате данного экспериментального исследования было осуществлено в общей сложности 2645 оценок BER, что соответствует обработке приблизительно $29,1 \cdot 10^9$ бит данных. Рассчитанные BER для четырех исследуемых моделей оптимального радиоимпульса представлены на рис. 8.

Результаты проведенного автором экспериментального исследования показали, что все предложенные модели СШП радиоимпульса сложной формы продемонстрировали существенный выигрыш в расстоянии безошибочной беспроводной передачи сигнала, по сравнению с моделью радиоимпульса простой формы на основе ИГ. Для наилучшего результата, относящегося к модели радиоимпульса ЧБСВ, он составляет 4,3 раза.

В сравнении с ранее максимальным показателем дальности безошибочного действия для спектральной маски FCC (4 м), данный выигрыш составляет 1,6 раз. С учетом того, что маска FCC характеризуется простой спектральной формой, а также большим уровнем допустимой ЭИИМ, можно сделать вывод, что предложенный метод спектральной модуляции на основе оптимизации формы радиоимпульсов позволяет существенно увеличить эффективность высокоскоростной передачи данных для СШП систем связи.

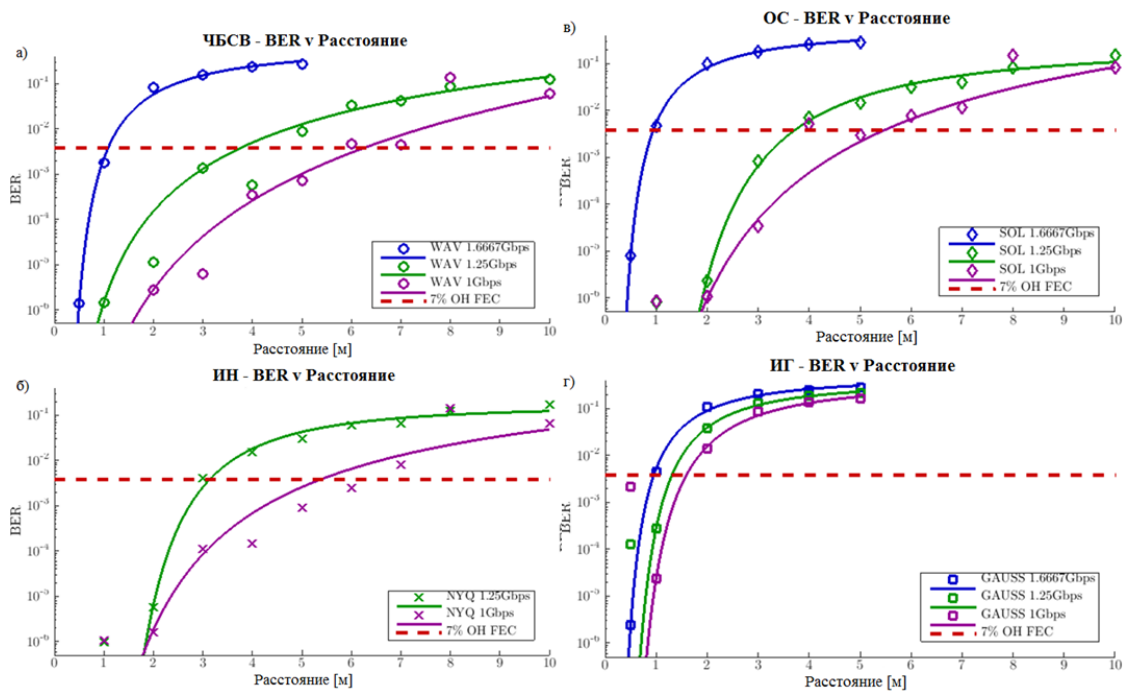


Рис. 8 – Зависимость BER от расстояния беспроводной передачи

Достигнутое максимальное расстояние беспроводной передачи для СШП систем связи – 6,5 м.

В заключении подводятся итоги проведенного исследования и сформулированы основные результаты работы.

В приложениях приведен код разработанных ИМ для СШП канала связи на основе предложенных методов спектральной модуляции сигнала, написанный в среде моделирования Matlab.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод повышения энергетической эффективности СШП системы связи, *основанный* на параметрической оптимизации формы радиоимпульсов, *отличающийся* использованием доминирующей триады в спектральном представлении сигнала, *позволяющий* увеличить дальность действия системы связи в условиях ограниченного отношения сигнал/шум. Разработанный метод позволяет увеличить энергетическую эффективность системы в 2,5 - 4 раза, а дальность связи – в 1,63 по сравнению с ранее максимальным значением. Достигнуто новое максимальное значение дальности для СШП систем связи, составляющее 6,5 м.

2. *Разработана* методика согласования формы радиоимпульса с характеристиками излучающего СШП устройства, *отличающаяся* возможностью адаптации формы радиоимпульса к битовой скорости передачи данных в канале, и *позволяющая* повысить спектральную эффективность системы связи. Разработанная методика позволяет увеличить скорость безошибочной передачи на 25% при несущественных потерях в КЭИМ, а спектральную эффективность – в 1,5 - 1,6 раза.

3. *Разработан* метод спектральной модуляции СШП сигнала, *основанный* на частотном манипулировании, *отличающийся* использованием скачко-

образной перестройки частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ, и *позволяющий* увеличить энергетическую эффективность канала связи. Разработанный метод модуляции позволяет увеличить энергетическую эффективность канала связи в 2,4 - 3,9 раз.

4. *Разработан* метод демодуляции СШП сигнала, *основанный* на спектральном анализе сигнала, *отличающийся* кодированием символов сообщения с помощью разнесения их по непересекающимся частотным интервалам внутри маски ГКРЧ и *позволяющий* снизить вероятность ошибки без увеличения мощности передаваемого сигнала. В результате снижения вероятности ошибки формируется запас отношения сигнал/шум, составляющий в 4-6 дБ, который может быть использован для увеличения дальности связи или повышения скорости передачи данных.

5. Результаты исследований диссертационной работы могут быть использованы в виде рекомендаций для проектирования СШП систем связи, отвечающих ограничениям, установленным в РФ, а также для повышения эффективности уже реализованных систем.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется разработка более сложных алгоритмов цифровой обработки сигнала на приемной стороне, для еще большего снижения вероятности ошибки и увеличения дальности беспроводного действия системы связи. Также планируются дальнейшие исследования в области способа формирования символов для предложенного метода модуляции на основе использования большего количества частотных полос внутри спектральной маски ГКРЧ, который позволил бы увеличить скорость передачи данных.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Грахова, Е.П. Моделирование СШП радиоимпульсов на основе производных Гаусса и Рэлея с учетом спектральной маски ГКРЧ / Е.П. Грахова, В.Х. Багманов, И.Л. Виноградова, И.К. Мешков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – т.10. №3. – с. 62-69.

2. Грахова, Е.П. Применение вейвлетов и функций Эрмита для моделирования СШП импульсов под требования маски ГКРЧ / Е.П. Грахова, Г.И. Абдрахманова, В.С. Кислинский // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – т.13, №4. – с. 391-398.

3. Grakhova, E.P. UWB Pulse shape filter and antenna design for ETSI mask / E.P. Grakhova, G.I. Abdrakhmanova, S.P. Shmidt, T. Kovacik // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – т.18, №3. – с. 297-305.

4. Грахова, Е.П. Моделирование СШП радиоимпульса с характеристикой типа «приподнятый косинус» в условиях ограничений спектральной маски ГКРЧ / Е.П. Грахова, И.К. Мешков, В.Х. Багманов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – т.18, №3, ч.2. – с. 43-47.

В других изданиях

5. Грахова, Е.П. Перспективы использования спектральной модуляции в широкополосных системах связи / Е.П. Грахова, В.Х. Багманов // Сб. трудов VIII Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых, г. Уфа. – 2013. – т.6. – с. 176-178.

6. Грахова, Е.П. Моделирование импульсов для СШП систем связи в условиях ограничений маски ГКРЧ на основе производных Рэлея / Е.П. Грахова, В.Х. Багманов, И.К. Мешков // Сб. трудов IX всероссийской школы-семинара аспирантов и молодых ученых, Уфа: УГАТУ. – 2014. – т. 5 – с. 82-86.

7. Грахова, Е.П. Моделирование импульсов для СШП систем связи в условиях ограничений маски ГКРЧ на основе производных Гаусса / Е.П. Грахова, В.Х. Багманов // Материалы VIII всероссийской молодёжной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа. – 2014. – с. 75-76.

8. Грахова, Е.П. Моделирование радиоимпульсов для СШП RoF систем связи в условиях ограничений маски ГКРЧ / Е.П. Грахова, И.К. Мешков // Материалы XV международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Казань. – 2014. – т.1. – с. 374-377.

9. Грахова, Е.П. Генерирование и излучение СШП сигнала под требования эффективной маски ГКРЧ РФ / Е.П. Грахова, А.Х. Султанов, Г.И. Абдрахманова // Материалы V всероссийской научной конференции «Армандовские чтения», секция 1, Муром. – 2015. – с. 28-32.

10. Грахова, Е.П. Моделирование радиоимпульсов с характеристикой типа «приподнятый косинус» для СШП ROF-систем связи в условиях ограничений маски ГКРЧ / Е.П. Грахова, И.К. Мешков // Материалы XVI международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа. – 2015. – т.2. – с. 107-110.

11. Grakhova, E.P. UWB SCRF effective mask calculation / E.P. Grakhova, G.I. Abdrakhmanova // Материалы XVI международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа. – 2015. – т.3. – с. 5-7.

12. Grakhova, E.P. UWB high-pass filter design for SCRF mask. / E.P. Grakhova, G.I. Abdrakhmanova, I.K. Meshkov, S.P. Shmidt // Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа. – 2015. – т.3. – с. 115-119.

13. Grakhova, E.P. IR-UWB radio-over-fiber system components development / E.P. Grakhova, A. Kh. Sultanov, I.L. Vinogradova, I.K. Meshkov [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications 2015: SPIE Proceedings. – 2015. – vol. 9807. – p. 980708 1-8.

14. Grakhova, E.P. First Experimental Impulse-Radio Ultra-Wideband Transmission Under the Russian Spectral Emission Mask / E.P. Grakhova, S. Rommel, A. Jurado-Novas, I.T. Monroy [et al.] // IEEE Electronics Letters. – 2016. – vol. 52 (10). – pp. 877-879.

Диссертант

Е.П. Грахова

ГРАХОВА Елизавета Павловна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати ____2016. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж ____экз. Заказ № ____

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Центр оперативной полиграфии
450008, Уфа-Центр, К.Маркса, 12