

На правах рукописи



АБДРАХМАНОВА Гузель Идрисовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2013

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

Научный руководитель: д-р техн. наук
Багманов Валерий Хусаинович,
профессор каф. телекоммуникационных
систем ФГБОУ ВПО «Уфимский
государственный авиационный технический
университет»

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, с.н.с.
Коровин Валерий Михайлович,
главный геофизик ОАО «Башнефтегеофизика»

д-р техн. наук, проф.
Мишин Дмитрий Викторович,
проректор по учебной работе ФГОБУ ВПО
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева-КАИ»**

Защита диссертации состоится «19» декабря 2013 г. в 10-00
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «15» ноября 2013 г.

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



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная технология сверхширокополосной (СШП) радиосвязи является перспективным направлением развития высокоскоростной передачи данных на короткие расстояния, обеспечивающая низкое энергопотребление, упрощение построения аппаратуры и снижение стоимости затрат, а также высокую эффективность использования спектра. СШП системы представляют большой интерес для разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, поскольку также позволяют работать на безлицензионной основе, а особенности передаваемых сигналов подразумевают отсутствие мощных усилителей и сложных компонентов обработки сигналов в составе приемо-передающих комплексов, но имеют ограничения по дальности действия (5-10 м). Реализация данных преимуществ подразумевает разработку особых методов формирования, обработки, передачи и приема сигналов, что подтверждается значительным количеством исследований и публикаций, представленных за последние годы.

Согласно определению Федерального агентства по связи США (Federal Communications Commission, FCC) для СШП систем выделен диапазон частот $3,1 \div 10,6$ ГГц, что подразумевает совместную одновременную работу с другими радиоустройствами при соблюдении требований по электромагнитной совместимости. В связи с этим определены нормы на уровень эффективно излучаемой мощности для СШП устройств – т.н. спектральная маска FCC. В рамках данных ограничений возникает важная задача формирования импульса, спектральная плотность мощности (СПМ) которого соответствовала бы маске FCC.

Отсутствие соответствующей современной элементной базы, способной эффективно работать со сверхкороткими импульсами, сдерживает массовое внедрение СШП технологии. Приемо-передающие антенны являются одним из ключевых элементов, влияющих на качество передачи/приема СШП сигналов, поскольку осуществляют дифференцирование сигнала. Основное направление патентов и исследований в области проектирования антенной техники для СШП устройств состоит в миниатюризации и снижении производственных затрат при обеспечении требуемых частотных и энергетических характеристик за счет применения новых форм и структур.

Данная диссертационная работа посвящена разработке способов повышения эффективности СШП систем связи на основе оптимизации передаваемых сигналов и излучающих структур.

Степень разработанности темы. При решении указанных задач в рамках диссертационного исследования использовались труды отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в различные аспекты: в области моделирования импульсов – А.Б. Шварцбург, G.B. Giannakis, S.N. Keshavarz, B. Berksoy, Z. Jia, A.M. Haimovich, H. Sheng; в области проектирования СШП антенн – A.R. Sebak, O.M. Ahmed, A.M. Abbosh, M. Ojaroudi, M. Naser-Moghaddasi; в области применения фракталов – В.В. Mandelbrot, А.А. Потапов, В.Х. Багманов.

Представленные в литературе модели импульсов построены на применении производных импульса Гаусса и других функциях, неприемлемых для описания реальных сигналов и не максимизирующих эффективность использования маски FCC. При проектировании СШП антенн не учитывается согласование с передаваемым сигналом. В связи с этим предлагается расширить диапазон частот и рассмотреть возможность миниатюризации за счет применения новых геометрий, в частности, фракталов. Актуальность обозначенной проблемы определила цель и основные задачи исследования.

Целью исследования является повышение эффективности СШП систем связи за счет оптимизации формы излучаемых импульсов, соответствующих маске FCC.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели СШП канала связи с учетом многолучевого распространения сигналов.
2. Исследование влияния формы импульсов на энергетическую эффективность СШП канала в классе линейных комбинаций производных импульса Рэлея и функций Лагерра.
3. Повышение энергетической эффективности использования спектральной маски СШП канала связи за счет оптимизации формы излучаемых радиоимпульсов.
4. Исследование путей повышения эффективности СШП систем связи на основе применения новых излучающих структур.

Объект исследований. СШП беспроводные системы связи, характеризующиеся наличием ограничений на уровень эффективно-излучаемой мощности (ЭИМ) и в связи с этим малой дальностью действия.

Предмет исследований. Влияние формы импульсов на эффективность СШП систем связи.

Научная новизна работы:

1. *Разработана* математическая модель СШП канала связи, основанная на стохастическом представлении импульсных процессов, отличающаяся учетом многолучевой структуры СШП канала и позволяющая согласовать профиль интенсивности принимаемого сигнала с эмпирическими моделями затухания сигнала в реальных условиях.
2. *Разработана* технология синтеза СШП радиоимпульсов на основе функциональной зависимости характеристик канала от формы импульсов, отличающаяся процедурой оптимизации и позволяющая повысить энергетическую эффективность канала связи.
3. *Разработаны* модели СШП радиоимпульсов на основе суперпозиции функций Лагерра и производных импульса Рэлея, которые в отличие от известных аналогов обладают более высоким коэффициентом использования маски FCC, что позволяет увеличить дальность связи, скорость передачи и помехоустойчивость.
4. Для практической реализации СШП технологии предложены модели миниатюрных излучающих элементов на основе планарных структур, отличаю-

и применением фрактальной технологии и *позволяющие* эффективно излучать короткие импульсные сигналы в широкой полосе частот.

Теоретическая и практическая ценность работы. Применение разработанных импульсов и излучающих структур позволяет повысить энергетическую эффективность СШП систем связи – увеличение коэффициента использования маски FCC позволяет создать энергетический запас, который может быть использован для увеличения дальности связи, скорости передачи или помехоустойчивости. Показана возможность практической реализации.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.

Методология и методы исследования. В работе использованы основные положения теории фракталов, алгоритмов, электрической связи, спектрального анализа, распространения радиоволн. Применены методы математического и компьютерного моделирования, в том числе программирования. Для оценки эффективности предлагаемых моделей использовались результаты численного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель СШП многолучевого канала связи, *основанная на* стохастическом представлении импульсных процессов, *отличающаяся* учетом многолучевой структуры СШП канала и *позволяющая* согласовать профиль интенсивности принимаемого сигнала с эмпирическими моделями затухания сигнала в реальных условиях.

2. Результаты исследований влияния формы импульсов на энергетическую эффективность СШП канала и технология синтеза СШП радиоимпульсов *на основе* функциональной зависимости характеристик канала от формы импульсов, *отличающаяся* процедурой оптимизации и *позволяющая* повысить энергетическую эффективность канала связи.

3. Модели СШП радиоимпульсов *на основе* суперпозиции функций Лагерра и производных импульса Рэлея, которые *в отличие* от известных аналогов обладают более высоким коэффициентом использования маски FCC, что *позволяет* увеличить дальность связи, скорость передачи и помехоустойчивость.

4. Модели миниатюрных излучающих планарных элементов *на основе* планарных структур, *отличающиеся* применением фрактальной технологии и *позволяющие* эффективно излучать короткие импульсные сигналы в широкой полосе частот.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Обоснованность результатов, полученных в работе, базируется на использовании апробированных научных положений и методов исследования, согласованности экспериментальных результатов с известными теоретическими положениями.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается данными проведенных численных экспериментов.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты работы обсуждались на XI-XII, XIV международной научно-технической конфе-

ренции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, Казань, Самара 2010-2011, 2013; IV-V Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2010-2011; студенческой научно-теоретической конференции в секции «Многоканальные телекоммуникационные системы», Уфа, 2010; вузовском туре программы «У.М.Н.И.К.-2010, 2011», Уфа, 2010-2011; VII Всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники», Уфа, 2012; XXXVIII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2012; XIX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2012», Москва, 2012; научно-технических встречах в Университете Тренто (г. Тренто, Италия), 2012-2013; а также на семинарах кафедры телекоммуникационные системы УГАТУ, 2010-2013.

Работа поддержана грантом Европейского Союза «Erasmus Mundus Action 2 MULTIC» на проведение исследований на базе исследовательского центра ELEDIA (Университет Тренто, Италия).

Результаты работы применены при выполнении научно-исследовательского проекта, реализуемого в рамках гранта Минобрнауки России по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение № 14.В37.21.1974).

Личный вклад. Постановка основных задач принадлежит научному руководителю. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. При выполнении работ, опубликованных в соавторстве, научный руководитель принимал участие в обсуждении результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 научных статей в периодических изданиях из списка ВАК, 8 докладов в сборниках трудов международных и российских конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 160 рисунков, библиографический список из 102 наименований, приложения из 7 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указаны цель исследования, его научная новизна и актуальность, основные результаты, выносимые на защиту, теоретическая и практическая ценность работы, дана общая характеристика работы и приведено ее краткое содержание.

В первой главе представлен обзор современной сверхширокополосной технологии и показано текущее состояние исследований в области моделирования импульсов и проектирования антенн. Сделан вывод, что данное направление является интересным, перспективным и содержит много потенциальных возможностей для совершенствования.

Глава 2 посвящена проектированию СШП канала связи, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

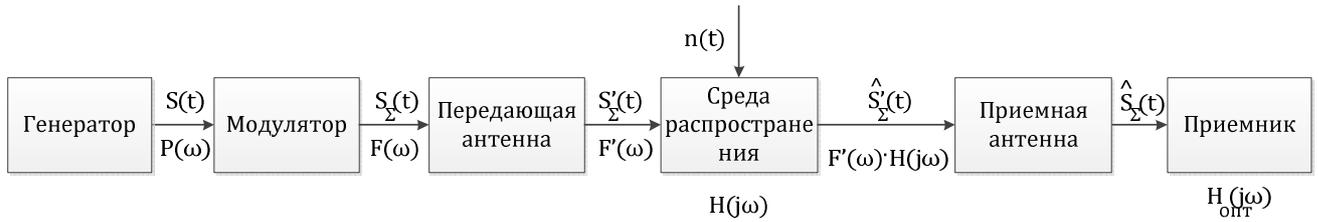


Рисунок 1 – Структурная схема системы связи

В качестве сигнала выбрана последовательность прямоугольных импульсов, промодулированных по временному положению (рисунок 2), где момент появления импульса может быть представлен в виде:

$$t_{2n}^{(k)} = nT \pm v_n^{(k)}, \quad (1)$$

где T – длина тактового интервала, с; $v_n^{(k)}$ – временной сдвиг, определяющий приход «0» или «1» и равный 1/4 от длительности импульса, с.

Спектральная плотность мощности данной последовательности:

$$F(\omega) = \frac{2\tau_0^2 a^2}{T} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\omega\tau_0}{2}}{\left(\frac{\omega\tau_0}{2}\right)^2} \cdot \left\{ 1 - (p_1^2 + p_2^2 + p_1 \cdot p_2 \cdot 2 \cos(2\omega v_n^{(k)})) + \right. \\ \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot (p_1^2 + p_2^2 + p_1 \cdot p_2 \cdot 2 \cos(2\omega v_n^{(k)})) \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi r}{T}\right) \right\}. \quad (2)$$

где τ_0 – длительность импульса, с; a – амплитуда, В; ω – круговая частота, рад/с; p_1, p_2 – вероятности появления «0» и «1».

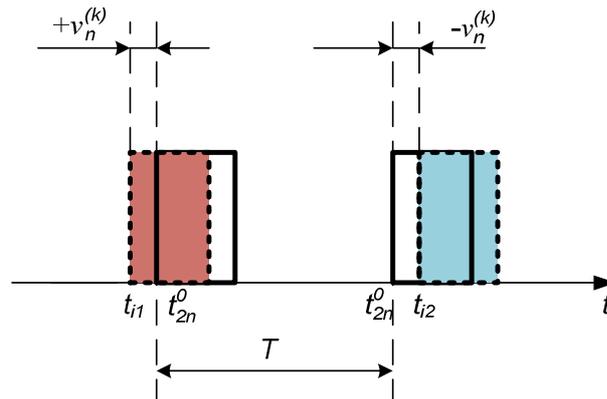


Рисунок 2 – Модель сигнала с учетом время-импульсной модуляции

Распространение сигнала в многолучевой среде от передатчика к приемнику характеризуется тем, что полученный сигнал состоит из нескольких дискретных многолучевых компонентов, приводящих к появлению изолированных пиков $s(t_{пр})$, называемых пальцами или отраженными сигналами (рисунок 3).

Мощность принятого сигнала можно представить как функцию, обратно пропорциональную степенной функции расстояния:

$$P_r \propto d^{-\alpha}, \quad \text{Вт}, \quad (3)$$

где d – расстояние между приемником и передатчиком, м; α – коэффициент затухания. Поскольку для детерминированной модели $\alpha = 2$, то уровень сигнала на выходе приемной антенны:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad \text{Вт}, \quad (4)$$

где P_t – мощность передатчика, Вт; G_t и G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; λ – длина волны, м, и учитывая, что

$$d = c \cdot t_{\text{пр}}, \quad c = \text{const}, \quad (5)$$

где c – скорость света, м/с; $t_{\text{пр}}$ – время прихода многолучевого компонента, с, то

$$\bar{P}_r \propto \frac{1}{t_{\text{пр}}^2}. \quad (6)$$

При этом среда распространения считается нормальной, с равномерным распределением неоднородностей, а потому профиль интенсивности многолучевого распространения имеет экспоненциальный спад с «легкими» хвостами, где время прихода многолучевых компонентов распределено по закону Пуассона.

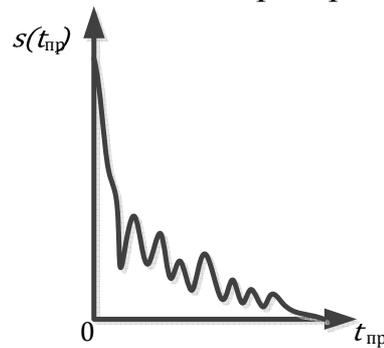


Рисунок 3 – Профиль интенсивности многолучевого распространения

Однако согласно эмпирическим моделям распространения радиоволн (модели Хаты, Ли, Окамуры, Уолфиша-Икегами) значение показателя степени α отличается от 2, и реальная среда имеет фрактальную структуру.

С учетом вышесказанного введем величину $\beta = \alpha - 2$. Тогда

$$\bar{P}_r \propto \frac{1}{d^{\beta+2}}. \quad (7)$$

где β зависит от характера местности и для различных сред составляет $1 \div 4$. Тогда по аналогии с (4) – (6) имеем:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 t_{\text{пр}}^{\beta+2}}. \quad (8)$$

В данном случае профиль интенсивности многолучевого распространения будет спадать по закону Парето с «тяжелыми» хвостами, что соответствует эмпирическим данным. Детектирование подобного принятого сигнала может быть осуществлено приемником прямого усиления.

Стоит отметить, что в представленной модели канала связи не учитывается тот факт, что спектр прямоугольного импульса не соответствует маске FCC на уровень излучения СШП устройств, а, значит, подобный сигнал будет мешать работе других устройств, работающих в непосредственной близости. В то же

время необходимо учитывать, что в процессе излучения импульса антенной происходит его дифференцирование, следовательно, разработка импульса должна производиться в комплексе с проектированием излучающей структуры.

В главе 3 рассматривается моделирование СШП импульса, соответствующего требованиям спектральной маски FCC (рисунок 4). В качестве базовых элементов были рассмотрены производные импульсов Рэлея (РП), Гаусса (ГП), модифицированные Эрмитовские импульсы (МЭИ) и импульсы на основе функций Лагерра (ФЛ). СШП импульсы должны удовлетворять условиям finiteness, непрерывности и излучения.

Временная форма, соответствующая n -ной производной импульса Рэлея:

$$s^{(n)}(t) = -\frac{4\pi t}{\sigma^2} s^{(n-1)}(t) - \frac{4\pi n}{\sigma^2} s^{(n-2)}(t). \quad (9)$$

где σ – коэффициент формы импульса, s . Ее нормированная СПМ:

$$|P_n(f)| = \frac{|S^{(n)}(f)|^2}{|S^{(n)}(f_m)|^2} = (\sigma f)^{2n+2} \left(\frac{\pi}{n+1}\right)^{n+1} \exp\{-(\sigma f \sqrt{\pi})^2 + n+1\}. \quad (10)$$

В данном случае рассматриваются первые 5 производных, нормирование производится относительно пикового значения СПМ на уровне -41,3 дБм/МГц.

Рост порядка производной и уменьшение значения σ сопровождается смещением СПМ в ВЧ область, а также расширением полосы (справедливо только для σ). Поскольку производные порядков $n = 1 \div 3$ не удовлетворяют маске FCC при любом значении σ , то был выбран импульс, соответствующий производной порядка $n = 4$.

Для увеличения спектральной эффективности оптимальный импульс должен быть представлен в виде:

$$s_{\text{opt}}(t) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot s_i^{(4)}(t, \sigma_i), \quad (11)$$

где w_i – весовой коэффициент. Пусть $N = 2$, будем искать решение в виде вектора $[w_1, w_2, \sigma_1, \sigma_2]$.

Задача оптимизации формулируется как следующая задача условной минимизации:

$$F_1 = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |P_{\text{FCC}}(f) - P_{\text{opt}}(f)|^2 df \rightarrow \min_{s_{\text{opt}}(t)}, \quad (12)$$

при условиях:

$$\int_0^{\infty} s_{\text{opt}}(t) dt = S(f)|_{f=0} = 0. \quad (13)$$

$$P_{\text{opt}}(f) \leq P_{\text{FCC}}(f), \quad (14)$$

где P_{opt} – СПМ оптимального импульса, определяемая согласно (10), P_{FCC} – СПМ маски FCC:

$$P_{\text{FCC}}(f) = \bigcup_{i=1}^6 P_i(f), \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 P_1(f) &= -41,3 \text{ дБ при } 0 \leq f < 0,96 \text{ ГГц}; \\
 P_2(f) &\leq -75,3 \text{ дБ при } 0,96 \leq f < 1,61 \text{ ГГц}; \\
 P_3(f) &\leq -53,3 \text{ дБ при } 1,61 \leq f < 1,99 \text{ ГГц}; \\
 P_4(f) &\leq -51,3 \text{ дБ при } 1,99 \leq f < 3,1 \text{ ГГц}; \\
 P_5(f) &\leq -41,3 \text{ дБ при } 3,1 \leq f < 10,6 \text{ ГГц}; \\
 P_6(f) &\leq -51,3 \text{ дБ при } f \geq 10,6 \text{ ГГц},
 \end{aligned}$$

Рассчитаем значение σ_1 для первого импульса таким образом, чтобы вписать левый фронт СПМ первого импульса в маску FCC, и аналогично для второго импульса рассчитаем σ_2 так, чтобы зафиксировать правый фронт СПМ второго импульса. Далее суммируем полученные импульсы с коэффициентами w_1 и w_2 , рассчитанными т.о., чтобы СПМ суммарного импульса не выходила за границы маски, и тогда конечный результат – [0,982; 0,684; 0,226; 0,180]. СПМ данного импульса РИ1 (рисунок 4) соответствует маске FCC, но использование спектра в пределах маски FCC неэффективно.

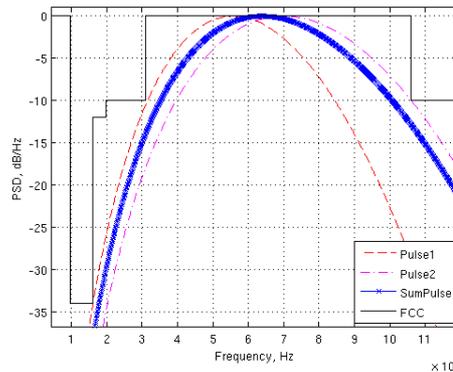


Рисунок 4 – Нормированная СПМ оптимального импульс РИ1

Тогда рассчитаем σ_1 и σ_2 таким образом, чтобы СПМ одиночных импульсов несколько выходили за границы маски, и увеличим их количество до трех. Назовем этот синтезируемый импульс РИ3 (рисунок 5) с рассчитанным вектором [[0,657 1,264 0,878 0,257 0,276 0,175]]. Можно видеть, что данный комбинационный импульс отлично вписывается в маску FCC и при этом обладает более высокой эффективностью использования маски по сравнению с РИ1.

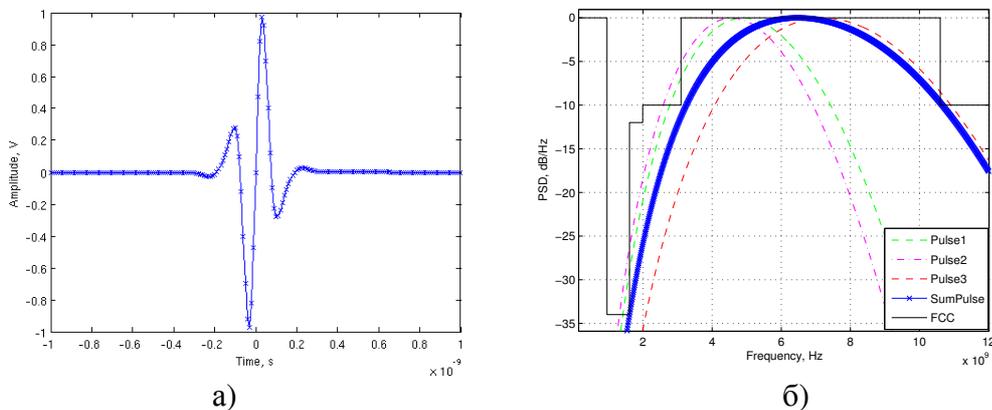


Рисунок 5 – Оптимальный импульс РИ3: а) временная форма; б) СПМ

Однако производные импульса Рэлея являются идеализированными, и получить производную четвертого порядка на практике довольно проблематично ввиду нетерпимости к малейшим шумам. В связи с этим рассмотрим функции Лагерра (ФЛ) вида:

$$F_0^{(1)}(t) = B[L_0^{(1)}(t) + L_1^{(1)}(t)] = B \cdot \exp(-\sigma t) \cdot (6\sigma t^{1/2} - 4\sigma^2 t^{1.5}); \quad (16)$$

где B – коэффициент веса и фронта; σ – коэффициент формы.

В результате процесса моделирования, заключающегося в последовательном подборе коэффициентов и увеличении количества используемых ФЛ с целью удовлетворения маске FCC, был разработан импульс ЛИ1 (рисунок 6), СПМ которого несколько выходит за границы ввиду значительной ширины СПМ и невозможности полностью подавить НЧ часть:

$$s_{\text{opt}}(t) = \sum_{i=1}^4 (b_{1i} L_0^{(1)}(t, \sigma_{1i}) + b_{2i} L_1^{(1)}(t, \sigma_{2i})), \quad (17)$$

где вектор параметров следующий:

b_{11}	b_{21}	b_{12}	b_{22}	b_{13}	b_{23}	b_{14}	b_{24}
-0,22	3,48	3,9	-1,05	-0,2	-0,1	-0,11	0,14

σ_{11}	σ_{21}	σ_{12}	σ_{22}	σ_{13}	σ_{23}	σ_{14}	σ_{24}
$7,82 \cdot 10^{10}$	$3,51 \cdot 10^{10}$	$1,19 \cdot 10^{10}$	$0,45 \cdot 10^{10}$	$1,68 \cdot 10^{10}$	$0,8 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$8,0 \cdot 10^{10}$

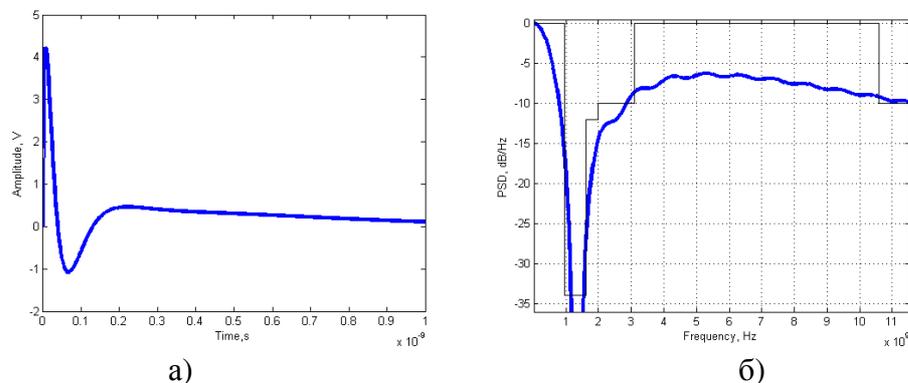


Рисунок 6 – Оптимальный импульс ЛИ1: а) временная форма; б) СПМ

Аналогично были смоделированы импульсы на основе суммы двух третьих ГП (ГИ1), сумме двух четвертых РП (РИ2) и сумме двух вторых РП (РИ4). Проведем сравнение синтезированных импульсов с представленными в литературе (таблица 1), используя коэффициент использования маски (КИМ):

$$F_2 = \frac{P_{\text{opt}}}{P_{\text{FCC}}} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Очевидно, что импульс РИ3 демонстрирует наибольшую эффективность, и выигрыш по сравнению с представленными в литературе импульсами ГИ2 – ГИ4 составляет в среднем на 60%. Импульс ЛИ1 обладает меньшей эффективностью и неидеально вписывается в маску, однако наиболее приемлем для описания реальных сигналов.

Глава 4 посвящена разработке методов повышения эффективности СШП систем связи за счет проектирования новых излучающих структур. Требуемый диапазон – $3,1 \div 10,6$ ГГц по уровню -10 дБ коэффициента отражения S_{11} . В качестве базового элемента выбран круговой монополюль радиусом $r = 12$ мм (рисунок 7). Диэлектрическая подложка толщиной T_s используется как основа, на лицевой стороне которой размещены медные излучающий элемент (ИЭ), центральный проводник (ЦП) и плоскость земли (ПЗ). Фрактальность предложенной антенны заключается в особом способе упаковки элементов, коэффициент масштаба δ определяет, во сколько раз будут отличаться размеры соседних итераций (рисунок 8).

Таблица 1

Название импульса	$F_2, \%$	$P_1, \text{ мВт}$	$P_1, \text{ дБм}$
Маска FCC	100,00	0,555	-2,55
РИ2 (сумма РП, $N = 2, n = 4$)	93,60	0,519	-2,39
РИ3 (сумма РП, $N = 3, n = 4$)	94,44	0,524	-2,41
РИ4 (сумма РП, $N = 2, n = 2$)	88,66	0,492	-2,26
ГИ1 (сумма ГП, $N = 2, n = 3$)	92,09	0,511	-2,35
ЛИ1 (сумма ФЛ, $N = 4, n = 1$)	77,08	0,428	-1,97
ГИ2 (сумма четырех суб-импульсов, каждый из которых составлен не менее, чем из восьми ГП, $n = 1 \div 15, [6]$)	35,67	0,198	-0,91
ГИ3 (комбинация ГП, $n = 1 \div 15, \sigma = 0,35 \text{ нс}, [7]$)	31,81	0,177	-0,81
ГИ4 (комбинация ГП, $n = 1 \div 15, \sigma$ – различные, [7])	32,40	0,179	-0,83

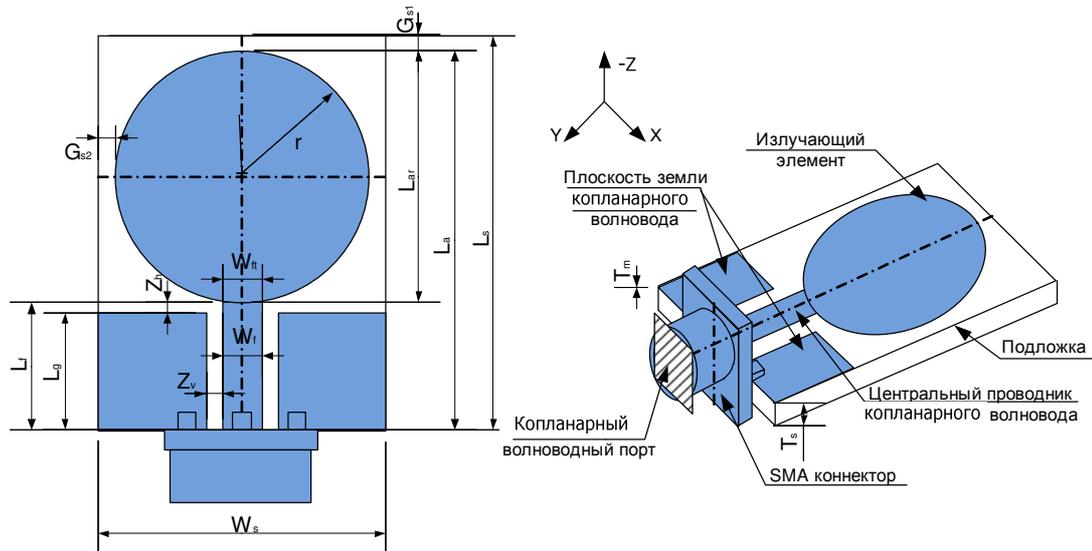
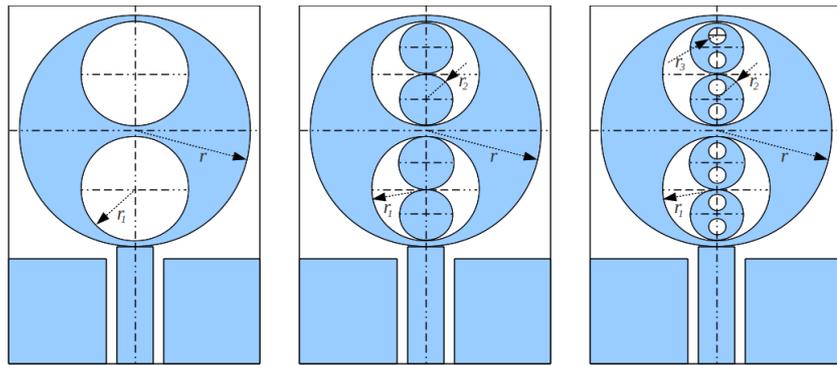


Рисунок 7 – Нулевая итерация антенны

Суть моделирования заключается в том, что на каждом этапе из рассматриваемых характеристик выбирается наиболее перспективная. Первоначально определяется геометрия антенны на основе изучения зависимости S_{11} от уровня итерации фрактала и δ .

Рисунок 8 – Первая, вторая и третья итерации антенны ($\delta = 2$)

Так, каждому новому порядку соответствует одна дополнительная резонансная частота. Рост δ сопровождается повышением уровня S_{11} в четных диапазонах и снижением – в нечетных, а начиная с $\delta = 3$, характеристики становятся более пологими и гладкими, количество резонансов остается постоянным. Рассматривая данные изменения в рамках вертикального и горизонтального расположения кругов, сделан выбор в пользу первого, $\delta = 6$, вторая итерация (рисунок 9, а). Рабочие диапазоны частот: 3,825÷4,242 ГГц и 6,969÷13,2 ГГц. Далее проводится пошаговая оптимизация антенны с целью расширения диапазона до величины 3,09÷15 ГГц (рисунок 9, б). Итоговый вид антенны представлен на рисунке 10, размеры составляют 34×28 мм².

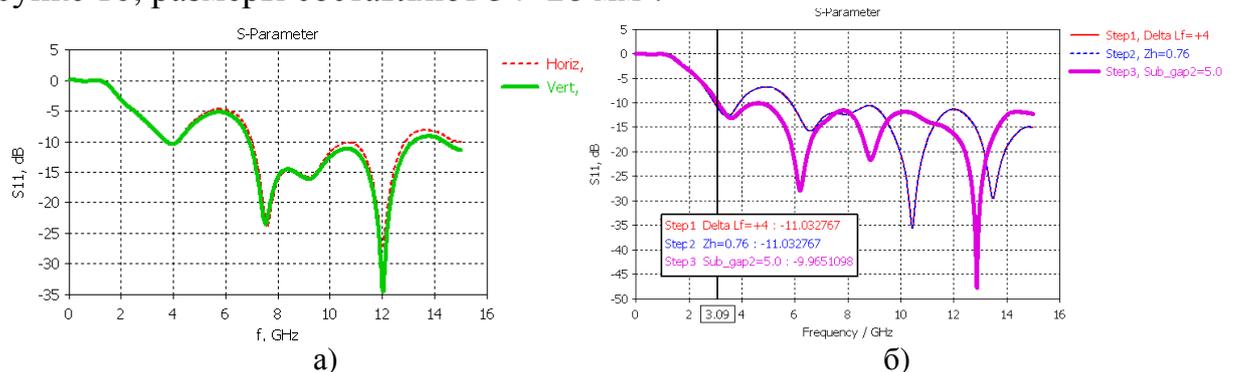
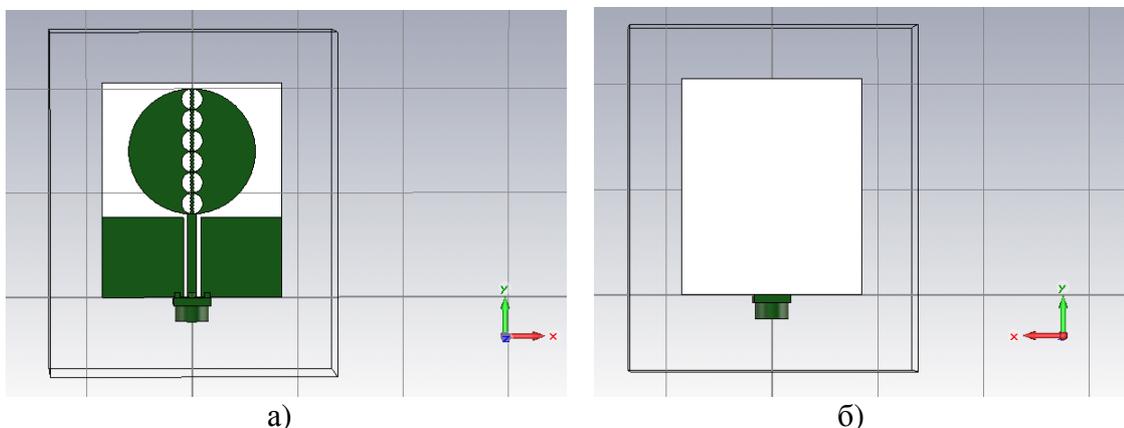
Рисунок 9 – Зависимость S_{11} : а) сравнение горизонтального и вертикального расположения; б) динамика пошаговой оптимизации

Рисунок 10 – Внешний вид антенны: а) лицевая сторона; б) оборотная сторона

Согласно рисунку 11 действительная составляющая импеданса в рабочей полосе согласована на 50 Ом, а мнимая колеблется относительно нулевого уров-

ня. Помимо этого антенна характеризуется широкой диаграммой направленности, что обеспечивает прием сигналов с разных направлений.

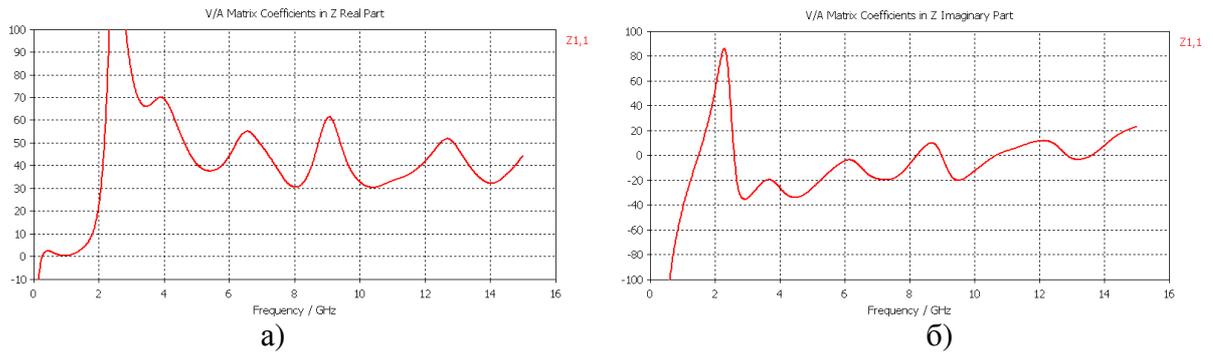


Рисунок 11 – Частотная зависимость импеданса Z : а) действительная часть; б) мнимая часть

Далее представлены результаты моделирования предложенной автором Bug-антенны (от англ. «bug» – жук). Геометрия состоит из ИЭ, сформированного двумя круговыми структурами радиусами r и r_1 , отстоящими на расстоянии s , копланарного волновода, включающего ЦП и ПЗ, диэлектрической подложки и SMA-коннектора, предназначенного для питания антенны посредством волноводного порта (аналогично фрактальной антенне).

В данном случае процесс проектирования включает 10 шагов, направленных на расчет геометрических параметров антенны. Динамика пошагового изменения представлена на рисунке 12, итоговый вид антенны – на рисунке 13. Размеры – $29,5 \times 19 \text{ мм}^2$, диапазон частот $\Delta f = 3,132 \div 15 \text{ ГГц}$.

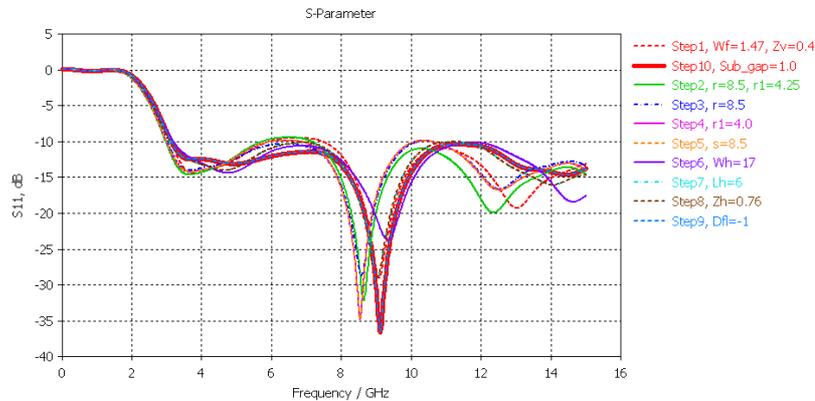


Рисунок 12 – Динамика пошагового изменения S_{11}

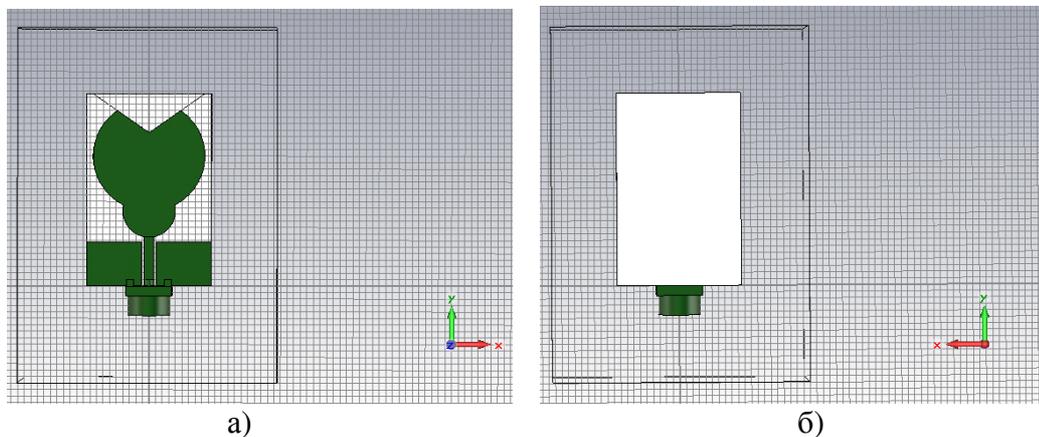


Рисунок 13 – Внешний вид Bug-антенны: а) лицевая сторона; б) оборотная

Далее произведен расчет параметров антенн, рассмотренных ранее (назовем их ФА1 и Bug1), на основе алгоритмов оптимизации – роя частиц (АРЧ) и генетического (ГА). Пусть модификации ФА2 и Bug2 рассчитаны на основе ГА, ФА3 и Bug3 – на основе АРЧ.

Целевая функция имеет вид:

$$S_{11} < -15 \text{ дБ при } \Delta f = 3,1 \div 10,6 \text{ ГГц.} \quad (19)$$

Сравнение спроектированных антенн по диапазону частот и размерам представлено в таблице 2 для случая возбуждения импульсом РИЗ (см. Глава 3).

Таблица 2 – Сравнение антенн ФА1-ФА3, Bug1-Bug3

Название	Δf , ГГц	Размеры, мм ²
ФА1	3,04÷15	34×28
ФА2	3,13÷4,44; 5,055÷15	39,91×33,11
ФА3	3,13÷4,18; 5,01÷7,60; 8,11÷14,35	41,21×35,94
Bug1	3,12÷15	29,5×19
Bug2	2,82÷15	33,58×24,33
Bug3	2,79÷15	34,48×30,86

Очевидно, что применение алгоритмов для оптимизации структуры фрактальных антенн не позволило обеспечить функционирование во всем СШП диапазоне, хотя для Bug-антенн рабочая полоса еще больше расширилась за счет интегрального наложения нескольких резонансов. В обоих случаях размеры антенн оказались больше, чем при пошаговой оптимизации.

Оценим эффективность СШП системы связи, полученную за счет применения разработанных оптимальных импульсов РИЗ (он обеспечивает наибольшее значение КИМ) и ЛИ1 (наиболее приближен к реальному сигналу) и антенн ФА1 и Bug1 (минимальные размеры и самый широкий диапазон частот). Рассмотрим следующие сочетания:

- Модель1 = РИЗ + ФА1;
- Модель2 = РИЗ + Bug1;
- Модель3 = ЛИ1 + ФА1;
- Модель4 = ЛИ1 + Bug1;
- Модель5 = ГИ2 [6] + антенна [48] с усилением 1,5 дБи;
- Модель6 = ГИ3 [7] + антенна [48] с усилением 1,5 дБи;
- Модель7 = ГИ4 [7] + антенна [48] с усилением 1,5 дБи.

Пусть мощность шума для случая белого гауссовского шума будет величиной постоянной ($N = 310,5 \text{ пВт} = -65,07 \text{ дБм}$), а мощность сигнала на входе приемника:

$$P_2 = \frac{G_2 \cdot c^2}{(4\pi r)^2} \int_{3,1 \cdot 10^9}^{10,6 \cdot 10^9} \frac{P_1(f)}{f^2} df, \text{ Вт,} \quad (20)$$

где $P_1(f)$ – ЭИМ передатчика, Вт; G_2 – коэффициент усиления приемной антенны; c – скорость света, м/с; r – расстояние, м; f – частота, Гц.

Оценим отношение сигнал/шум (рисунок 14):

$$SNR = 10 \lg \frac{P_2}{N}, \text{ дБ.} \quad (21)$$

Очевидно, что применение импульса с наибольшим значением КИМ и антенны с максимальным доступным усилением обеспечивают наибольшую дальность связи и отношение сигнал/шум, что в данном случае соответствует Модели1. При этом рабочее расстояние увеличивается в 2,14 раз по сравнению с Моделью5 и в 2,26 раз по сравнению с Моделью6 и Моделью7. По рисунку 14 также можно видеть, что при фиксированной дальности связи увеличивается отношение сигнал/шум, в частности, для Модели1 на 6,66 дБ по сравнению с Моделью5, а следовательно, и помехоустойчивость.

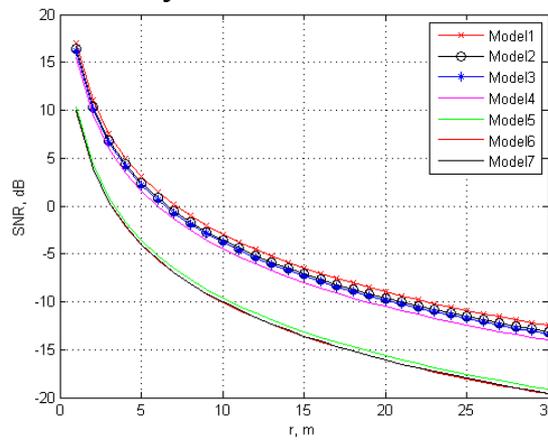


Рисунок 14 – Сравнение систем связи по отношению сигнал/шум

В то же время при фиксированной дальности связи может быть увеличена скорость передачи для Модели1 по сравнению с Моделью5 в 4,63 раз (рисунки 15, 16). При этом рассмотрена PAM модуляция, BER = 10^{-6} и BER = 10^{-3} .

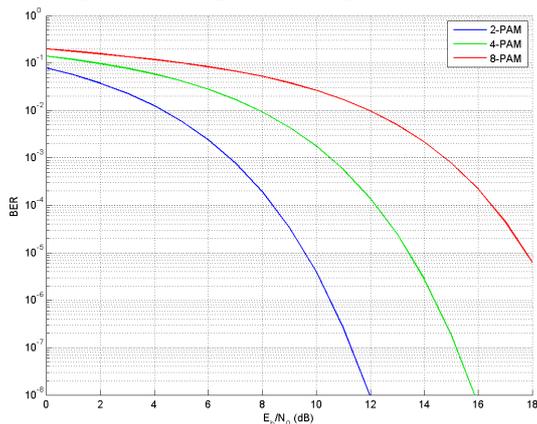


Рисунок 15 – Зависимость BER от отношения E_b/N_0

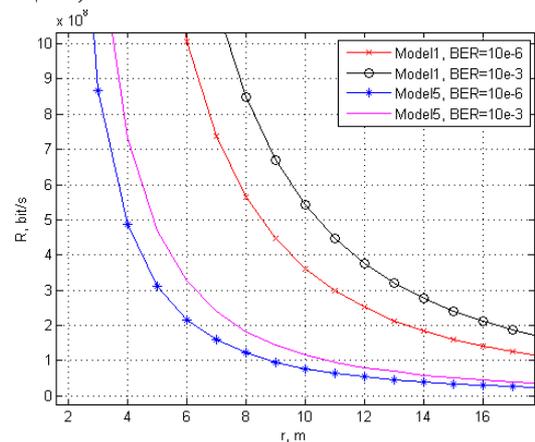


Рисунок 16 – Зависимость скорости передачи от дальности связи

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

В приложениях представлены текст программы по моделированию СШП импульсов и документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. *Разработана* математическая модель СШП канала связи, основанная на стохастическом представлении импульсных процессов, отличающаяся учетом многолучевой структуры СШП канала и позволяющая согласовать профиль интенсивности принимаемого сигнала с эмпирическими моделями затухания сигнала в реальных условиях.

2. *Разработана* технология синтеза СШП радиоимпульсов на основе функциональной зависимости характеристик канала от формы импульсов, отличающаяся процедурой оптимизации и позволяющая повысить энергетическую эффективность канала связи.

3. *Разработаны* модели СШП радиоимпульсов на основе суперпозиции функций Лагерра и производных импульса Рэлея, которые в отличие от известных аналогов обладают более высоким коэффициентом использования маски FCC (увеличение в среднем на 60%), что позволяет увеличить дальность связи в 2,14 раз, скорость передачи – в 4,63 раз и отношение сигнал/шум – на 6,66 дБ.

4. Для практической реализации СШП технологии предложены модели миниатюрных излучающих элементов на основе планарных структур, отличающиеся применением фрактальной технологии и позволяющие эффективно излучать короткие импульсные сигналы в широкой полосе частот (3,09÷15 ГГц).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Поскольку импульс, разработанный на основе ФЛ, не обеспечивает идеальное соответствие маске, то в дальнейшем предлагается устранить данный недостаток за счет применения алгоритмов оптимизации. Помимо этого интересно рассмотреть сигнал в виде последовательности модулированных импульсов и вписать его СПМ в маску FCC, а также рассмотреть возможность соответствия маске ГКРЧ (Государственная комиссия по радиочастотам), требования которой являются более жесткими. Обе представленные разновидности антенн рекомендуются к внедрению.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Моделирование СШП импульса на основе производных Рэлея и генетического алгоритма / Абдрахманова Г. И., Багманов В. Х. // Инфокоммуникационные технологии, т. 11, №3, 2013. Самара. – С. 84-88.
2. Сверхширокополосная антенна на основе фрактальных структур / Абдрахманова Г. И., Багманов В.Х. // Электротехнические и информационные комплексы и системы, № 3, т. 9, 2013. Уфа. – С. 52-59.
3. Моделирование СШП-антенн на основе алгоритмов оптимизации / Абдрахманова Г. И. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №4; URL: <http://www.science-education.ru/110-9849> (дата обращения: 15.08.2013).
4. Фрактальная сверхширокополосная антенна на основе кругового монополя / Абдрахманова Г. И. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2013. – №8; URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug13/6/text.html>.

5. Сверхширокополосная система связи на основе новых моделей импульсов и антенн / Абдрахманова Г. И., Багманов В.Х. // Вестник УГАТУ, т. 17, №4 (57), 2013. Уфа. – С. 152-159.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619817. Расчет сверхширокополосного импульса / Абдрахманова Г.И. Роспатент. М.: Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 16.10.2013.

В других изданиях

7. Проектирование канала передачи данных «УГАТУ-МЧС» / Султанов А.Х., Багманов В.Х., Абдрахманова Г.И., Денисова Ю. А. // Электронные устройства и системы: Межвуз. сб. научн. трудов. – Уфа, 2010. – С.167-172.

8. Разработка фильтра Колмогорова-Винера для сверхширокополосных систем передачи / Багманов В.Х., Абдрахманова Г.И. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докл. XI Межд. научн.-техн. конф. – Уфа, УГАТУ, 2010. – С. 187-189.

9. Разработка способа обнаружения слабого сверхширокополосного сигнала в шумах с использованием ПО «Matlab-Simulink» / Багманов В.Х., Абдрахманова Г.И. // Мавлютовские чтения: Сб. докл. V Всеросс. молод. научн. конф. – Уфа, УГАТУ, 2011. – С. 57-58.

10. Получение спектра импульсного СШП процесса / Абдрахманова Г.И. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докл. XII Межд. научн.-техн. конф. – Казань, КГТУ, 2011. – С. 39-40.

11. Эволюционные алгоритмы для улучшенных методов кластеризации в проектировании фазированных антенных решеток / Чириков Р.Ю., Абдрахманова Г.И., Рокка П., Багманов В.Х. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докл. XII Межд. научн.-техн. конф. – Казань, КГТУ, 2011. – С. 263-264. (опубликовано на английском языке).

12. Разработка фрактальных антенн для СШП систем связи / Абдрахманова Г.И., Абдрахманова А.И., Чириков Р.Ю. // Актуальные проблемы в науке и технике: Сб. научн. трудов VII Всеросс. зимн. школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Том 1. Информационные и инфокоммуникационные технологии. – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 153-156.

13. Разработка оптимальной антенны для СШП приложений / Абдрахманова Г.И. // Микроэлектроника и информатика – 2012: Сб. трудов XIX Всеросс. межвуз. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Москва, МИЭТ, 2012. – С. 209-210.

14. Применение функций Лагерра для моделирования формы импульсов в сверхширокополосных системах связи / Абдрахманова Г.И., Чириков Р.Ю., Багманов В.Х. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций – 2013: Сб. докладов XIV Межд. научн.-техн. конф. – Самара, ПГУТИ, 2013. – С. 187-191.

Диссертант



Г.И. Абдрахманова

АБДРАХМАНОВА Гузель Идрисовна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.11.2013. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 604.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12