

На правах рукописи

**Соловьев Дмитрий Михайлович**

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО  
ИМИТАТОРА МНОГОЛУЧЕВОГО РАДИОКАНАЛА С ЧАСТОТНО-  
ВРЕМЕННЫМ РАССЕЙНИЕМ**

Специальность 05.12.04 –  
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

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

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» (ЯрГУ) на кафедре «Радиотехнических систем»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Кзаков Леонид Николаевич**, зав. кафедрой «Радиотехнических систем» ЯрГУ.

Официальные оппоненты:

**Сизых Вадим Витальевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Специальное приборостроение и системы» института комплексной безопасности и специального приборостроения Московского технологического университета (МИРЭА).

**Силантьев Александр Борисович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Командных пунктов зенитных ракетных систем» Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны (ЯВВУ ПВО).

Ведущая организация:

ОАО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж).

Защита состоится 22 сентября 2016 г. в 15:00 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. 8а, МТУСИ, ауд. А – 448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://srd-mtuci.ru/index.php/ru/council> МТУСИ.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 219.001.04

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Терешонок М.В.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время наблюдается значительный прогресс в области беспроводных систем передачи информации (БСПИ) и их широкое применение в различных областях деятельности. Процесс разработки БСПИ непременно включает этап экспериментальной отладки и испытаний аппаратуры.

Натурные испытания приемопередающих устройств на реальных радиоканалах обладают существенными недостатками: высокие финансовые и временные затраты; отсутствие возможности воспроизведения полностью идентичных условий эксперимента; неконтролируемость параметров радиоканала и пр. Проведение натурных испытаний возможно только на поздних этапах технологического цикла разработки систем передачи информации, в тоже время в некоторых случаях оказывается необходимым производить отладку и тестирование алгоритмов работы аппаратуры на ранних этапах разработки. Разработчикам необходимо решение, позволяющее производить отладку и тестирование аппаратуры в лабораторных условиях, т.е. необходимо в режиме реального времени воспроизводить условия реальных радиоканалов.

Известно, что существенное ограничение на энергетическую эффективность систем радиосвязи накладывает частотно-временное рассеяние радиоканала. Данное свойство объясняется многолучевым распространением радиосигнала, когда сигнал преодолевает расстояние от передающей до приемной антенны по нескольким путям, таким образом, на приемной антенне суммируется несколько сигналов с различными ослаблениями, задержками и частотами (эффект Доплера), что может приводить к существенным флуктуациям уровня сигнала на входе приемника – замираниям.

Имитация многолучевых радиоканалов - это ключевой компонент в процессе разработки и верификации большинства беспроводных систем передачи информации. Имитаторы многолучевых радиоканалов (ИМР) являются важнейшими инструментами, применяемыми разработчиками при моделировании процессов, протекающих на физическом уровне БСПИ. Данные устройства позволяют существенно снизить финансовые и временные затраты на разработку и

отладку новых радиотехнических систем (РТС), обеспечивают возможность воспроизведения условий эксперимента.

Ключевыми факторами, стимулирующими развитие техники имитации каналов с частотно-временным рассеянием, являются: во-первых, увеличение энергетической эффективности систем связи, обусловленное увеличением ширины полосы и повышением спектральной эффективности за счет применения современных сигнально-кодовых конструкций, обеспечивающих возможность передачи информации вблизи предела Шеннона; во-вторых, широкое применение летательных аппаратов, в том числе беспилотных, с необходимостью передачи больших объемов информации на землю или на другой летательный аппарат на высоких относительных скоростях движения носителей, влечет за собой ужесточение требований к характеристикам имитатора, отвечающим за доплеровское рассеяние, таким, как ширина и форма доплеровского спектра; в-третьих, применение радиосетевых систем радиосвязи между многими подвижными объектами на несколько порядков усложняет методы проведения натурных испытаний, поскольку в таких испытаниях необходимо одновременно задействовать до нескольких десятков объектов и обеспечить технологической системой измерений их одновременность и синхронность. В этой ситуации применение имитационного моделирования становится единственно разумным реализуемым методом, обеспечивающим повторяемость испытаний всей радиосети и накопление достаточной статистики результатов.

Наибольший интерес представляет реализация полностью цифрового аппаратного имитатора. Такой имитатор обладает рядом преимуществ по сравнению с программными, аналоговыми или аналого-цифровыми имитаторами: работа в режиме реального времени с реальными сигналами, стабильность характеристик, точность управления параметрами радиоканала, большой динамический диапазон. Цифровые имитаторы обеспечивают возможность динамического изменения таких параметров радиоканала, как среднеквадратичный разброс задержек, интервал когерентности по времени, форма профиля задержки мощности, количество лучей, ширина и форма доплеровского спектра, полоса когерентности по частоте и т.д., тем самым, позволяя имитировать сложные, с точки зрения распространения радиоволн, протяженные во времени процессы. Примером может служить, полет

одного или нескольких летательных аппаратов в условиях горной местности. Применение цифровых имитаторов позволяет подключить к процессу моделирования геоинформационную систему, осуществляющую расчет электромагнитной обстановки в привязке к цифровой карте местности, с учетом рельефа, растительности, метеоусловий и других факторов, влияющих на характеристики радиоканала.

Ограничивающим фактором в применении цифровых имитаторов являются высокие вычислительные затраты, которые приводят к ужесточению требований к элементной базе и увеличению стоимости изделия. Таким образом, актуальной проблемой при реализации имитатора является решение задачи эффективного использования ограниченного вычислительного ресурса, чему и посвящена данная работа.

**Степень разработанности темы.** На сегодняшний день многие крупнейшие мировые производители радиоизмерительного оборудования такие, как Keysight Technologies, Rohde & Schwarz, Anritsu и другие, занимаются разработкой и производством имитаторов.

Значительный вклад в разработку общей методики моделирования процессов распространения радиосигналов по многолучевым радиоканалам внесли: Галкин А.П., Кловский Д.Д., Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков, Самойлов А.Г., Шон В.В. Басс Ф.Г., Фукс И.М., R.H. Clarke, W.C. Jakes и др. Отдельно следует отметить работы Борзова А.Б., Соколова А.В., Герасимова А.Б. и др., посвященные разработке детерминированных моделей радиоканалов, основанных на факетном представлении радиофизических сцен, позволяющих учитывать тонкую структуру сигналов, обусловленную особенностями геометрического строения радиоканала. Вопросы построения аппаратных имитаторов многолучевых радиоканалов рассматривались в отчете по научно-исследовательской работе Европейского института телекоммуникационных стандартов COST-207, а также в работах Ren F., Sivante W., Kempainen J. и др.

Анализ публикаций и выполненных диссертационных исследований показал, что существующие методики построения имитаторов многолучевых радиоканалов направлены на минимизацию вычислительных затрат. В должном объеме не рассматривалась проблема выбора интервала дискретизации импульсной

характеристики радиоканала, возникающая при переходе от непрерывной модели многолучевого радиоканала, полученной в результате экспериментальных исследований, к дискретной модели, содержащей ограниченное количество лучей. Аппаратная имитация доплеровского рассеяния в соответствии с существующими моделями, основанными на применении доплеровских фильтров с конечной импульсной характеристикой, может привести к большим вычислительным затратам. Проблема выбора структуры и порядка доплеровского фильтра, связанная с эффективностью использования вычислительных ресурсов также не рассматривалась, что и определило одно из направлений исследований, выполненных в диссертации.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности аппаратного широкополосного имитатора радиоканала, в том числе динамического, с частотно-временным рассеянием, функционирующего в условиях реального времени.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка принципа построения аппаратного имитатора многолучевого мобильного радиоканала с режимом реального времени, основанного на учете характеристик, как радиоканала, так и радиосигнала системы связи.
2. Исследование влияния интервала дискретизации импульсной характеристики модели многолучевого радиоканала на энергетическую эффективность исследуемой системы радиосвязи.
3. Исследование влияния порядка доплеровского фильтра, отвечающего за имитацию частотного рассеяния радиоканала, на энергетическую эффективность исследуемой системы радиосвязи.
4. Выбор критерия оптимизации вычислительных ресурсов, обеспечивающего максимальную эффективность имитатора, функционирующего в режиме реального времени.
5. Исследование реализуемости аппаратного имитатора на основе предложенного метода оптимизации вычислительных затрат для моделирования реальных радиоканалов, в том числе динамических, характеристики которых меняются во времени.

6. Разработка экспериментального образца имитатора многолучевого радиоканала с поддержкой режима реального времени на базе ПЛИС.
7. Исследование и верификация экспериментального образца широкополосного имитатора многолучевого радиоканала.
8. Апробация экспериментального образца имитатора многолучевого радиоканала на реальных системах связи.

**Методы исследования.** Решение указанных выше задач осуществлялось с использованием методов математического анализа, методов имитационного моделирования, теории дискретных линейных систем, методов статистической радиотехники.

#### **Научная новизна.**

1. Разработан принцип построения аппаратного имитатора радиоканала с частотно-временным рассеянием с режимом реального времени, отличающимся от известных учетом, как свойств канала, так и характеристик радиосигнала системы радиосвязи.
2. Получены зависимости вероятности битовой ошибки исследуемой системы передачи информации от интервала дискретизации импульсной характеристики модели многолучевого радиоканала и порядка доплеровского фильтра, отвечающего за частотное рассеяние.
3. Предложен критерий оптимизации параметров имитатора многолучевого динамического радиоканала, отличающийся от известных, тем, что направлен на достижение оптимального соотношения между точностью моделирования и вычислительными затратами.
4. На основе критерия оптимизации получена структура вычислительного блока имитатора многолучевого динамического радиоканала, позволяющая реализовать аппаратный полностью цифровой имитатор с поддержкой режима реального времени.

#### **Практическая ценность работы.**

1. В диссертации разработан принцип построения аппаратного широкополосного имитатора многолучевого радиоканала, обладающего оптимальным соотношением между точностью воспроизведения свойств радиоканала и вычислительными затратами.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, в состав которого входят широкополосный аппаратный имитатор многолучевого радиоканала, выполненный на базе ПЛИС XILINX VIRTEX 6, и сервисный ПК с необходимым программным обеспечением для управления процессами моделирования.
3. Разработана методика исследования и верификации реализованного программно-аппаратного комплекса.
4. Полученные результаты позволяют сформулировать предложения по повышению эффективности существующих и перспективных имитаторов многолучевых радиоканалов.
5. Выполнен цикл исследований энергетической эффективности широкополосных систем радиосвязи в условиях многолучевого распространения радиосигнала, с применением разработанного программно-аппаратного комплекса.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Принцип построения аппаратного имитатора многолучевого динамического радиоканала с режимом реального времени, основанный на характеристиках частотного и временного рассеяния, отличающийся от известных учетом параметров системы передачи.
2. Предложенный критерий оптимизации имитатора повышает эффективность моделирования за счет достижения оптимального соотношения между точностью воспроизведения свойств радиоканала и вычислительными затратами. В зависимости от соотношений количественных характеристик радиоканала и системы передачи критерий позволяет от 2 до 20 раз снизить объем необходимых вычислительных ресурсов по сравнению с известными подходами.
3. Полученная структура вычислительного блока имитатора многолучевого динамического радиоканала позволяет реализовать аппаратный полностью цифровой имитатор с поддержкой режима реального времени с оптимальным соотношением между точностью воспроизведения характеристик радиоканала и необходимыми вычислительными затратами.



4. Реализованный экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса прошел апробацию в соответствии с разработанной методикой исследования и верификации.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность положений и выводов диссертации подтверждается апробацией работы, основные результаты которой обсуждались и докладывались на 14-й международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение»; всероссийской научно-практической конференции-выставке "Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения", г. Ярославль, 2011-2014 гг.; IV международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях»; международном научно-техническом семинаре «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях», 2013-2015 гг.; международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий REDS-2014»; международной молодежной научно-практической конференции «Путь в науку 2014», г. Ярославль. Основные результаты диссертации опубликованы автором в 9 статьях (6 из них – в журналах, рекомендованных ВАК РФ), 1 патенте на полезную модель, 2 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ, 17 докладах на международных и всероссийских конференциях и семинарах. Результаты диссертационной работы внедрены в НИР, выполненные кафедрой РТС ЯрГУ им. П.Г. Демидова, ОАО «КБ «Кунцево» (г. Москва), НИОКР – ОАО «Луч» (г. Рыбинск), ОАО «НПО «ТРАНСКОМСОФТ» (г. Дубна), ОАО «НПП «РАДИОСИГНАЛ» (г. Москва), учебный процесс кафедры РТС ЯрГУ им. П.Г. Демидова.

**Основное содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и одного приложения, содержит 138 страниц, включая приложение (5 стр.), 83 иллюстрации, 13 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы выбор темы диссертации, ее актуальность и научная новизна, сформулированы цель и задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание работы. Далее приведены сведения о

публикациях, апробации и реализации основных научных результатов.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние развития техники моделирования распространения радиосигналов по многолучевым радиоканалам. Показано, что наиболее популярным подходом к построению моделей многолучевых радиоканалов является использование многоотводной линии задержки. В рамках данного подхода, комплексная огибающая сигнала на выходе многолучевого радиоканала  $\tilde{y}(t)$  определяется выражением:

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^K \tilde{\alpha}_k(t) \tilde{s}(t - \tau_k), \quad (1)$$

где  $\tilde{s}(t)$  – комплексная огибающая сигнала на входе многолучевого радиоканала,  $\tilde{\alpha}_k(t)$  – комплексный коэффициент передачи  $k$ -го луча, который, как правило, может быть описан, как комплексный случайный процесс, распределение амплитуды, фазы и доплеровский спектр которого определяются характером движения передатчика и приемника, а также геометрией радиофизической сцены. Структурная схема многолучевого радиоканала на основе многоотводной линии задержки приведена на рис. 1

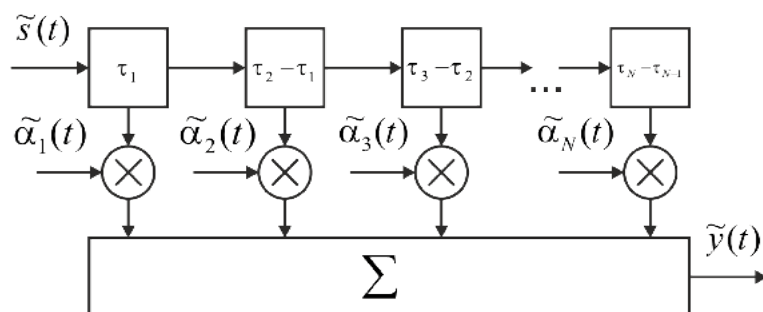


Рис. 1 Структурная схема многолучевого радиоканала на основе многоотводной линии задержки.

В рамках данной модели возникают две взаимосвязанные проблемы: первая проблема связана с выбором параметров модели, позволяющих адекватно смоделировать процесс распространения радиосигнала по многолучевому радиоканалу; а вторая – с большими вычислительными затратами, необходимыми для реализации модели, как на программном, так и на аппаратном уровне.

Классический подход к решению данных проблем представлен в отчете по научно-исследовательской работе Европейского института телекоммуникационных стандартов COST-207. Данный подход получил широкое применение при

разработке рекомендуемых моделей для различных стандартов мобильной радиосвязи (GSM, UMTS, LTE и др.). Основным преимуществом данного подхода являются низкие вычислительные затраты необходимые для проведения моделирования. Низкие вычислительные затраты определяются переходом от непрерывной импульсной характеристики к дискретной модели с малым количеством отсчетов (не более 16).

В конце первой главы приведена критика классического подхода, определены основные недостатки, сделан вывод об актуальности исследовании влияния перехода от непрерывной модели к дискретной на испытываемую систему радиосвязи.

**Во второй главе** рассматривается подход к выбору параметров ИМР существенно влияющих на вычислительные затраты в привязке к характеристикам конкретной системы передачи информации (ширине полосы и длительности информационного символа). Во временной области таким параметром является количество отводов линии задержки или интервал дискретизации импульсной характеристики для случая равномерной линии задержки. В частотной области таким параметром является порядок доплеровского фильтра.

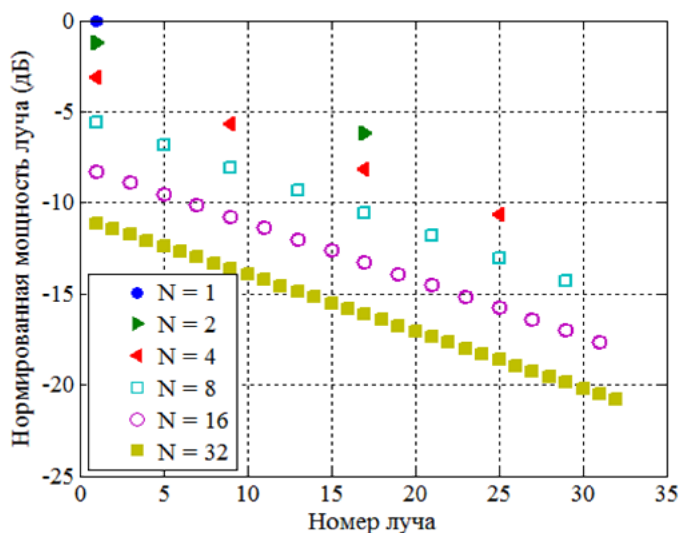


Рис. 2 Дискретный профиль задержки мощности.

Исследование влияния параметров ИМР на энергетическую эффективность СПИ осуществлялись при помощи методов имитационного моделирования в среде Matlab Simulink, обеспечивающих наперед заданную точность без ограничений на время вычислений. Исходными данными выступали профиль задержки мощности и

профиль частотного рассеяния, при этом было сделано предположение о независимости этих профилей, основанное на физическом обосновании.

Известно, что профиль задержки мощности в большинстве случаев экспоненциально спадает с увеличением времени задержки в канале. На рис. 2 приведены продискретизированные профили задержки мощности. Здесь  $N$  обозначает количество лучей, приходящихся на длительность информационного символа.

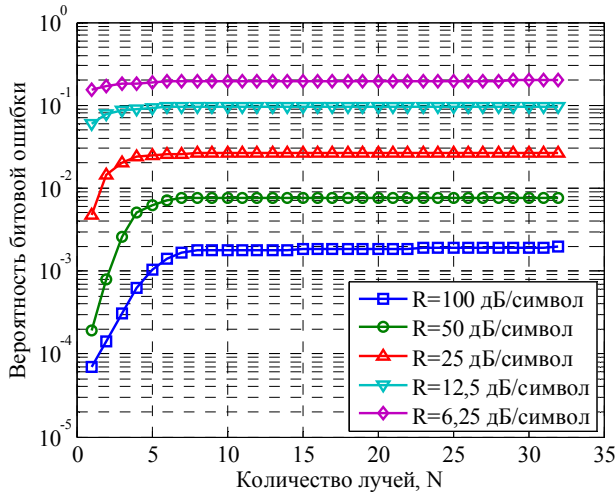


Рис. 3 Зависимость вероятности битовой ошибки от количества лучей  $N$ .

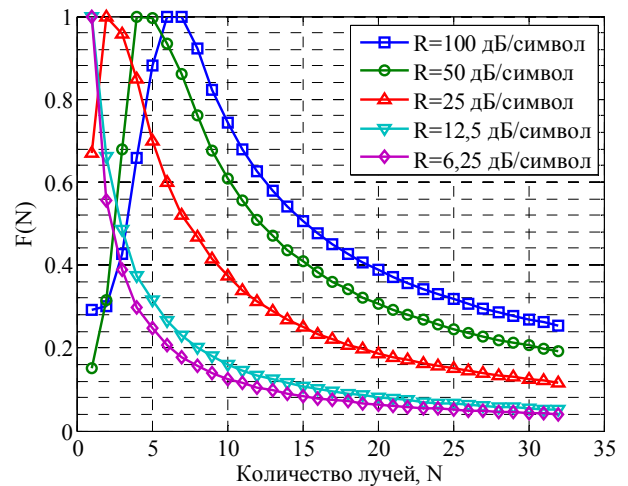


Рис. 4 График нормированной функции  $F(N)$ .

На рис. 3 приведена зависимость вероятности битовой ошибки системы передачи информации от количества лучей  $N$ , приходящихся на длительность информационного символа для различных скоростей спада профиля задержки мощности  $R$ . Анализ результатов исследования показывает, что при малом количестве лучей имитатор не адекватно воспроизводит условия реального радиоканала, поскольку его внутренний параметр влияет на вероятность битовой ошибки. С увеличением количества лучей вероятность битовой ошибки растет и при определенном значении, в зависимости от скорости спада профиля задержки мощности радиоканала, выходит в насыщение, дальнейшее увеличение количества лучей приведет к неэффективному использованию вычислительных ресурсов и увеличению стоимости имитатора без существенного улучшения его технических характеристик. Возникает задача выбора оптимального количества лучей,

приходящихся на длительность информационного символа системы передачи информации.

В качестве критерия оптимального выбора количества лучей  $\hat{N}$  предлагается:

$$\hat{N} = \arg\{\max(F(N))\}, \quad (2)$$

где

$$F(N) = \frac{E(N)}{N}, \quad (3)$$

$E(N)$  – вероятность битовой ошибки. Оптимальным значением  $N$  является значение аргумента  $\hat{N}$ , которое максимизирует функцию  $F(N)$ , характеризующую эффективность использования вычислительных ресурсов имитатора.

На рис. 4 приведен график нормированной функции  $F(N)$  для различных скоростей спада профиля задержки мощности. Параметр  $N$  обратно пропорционален интервалу дискретизации профиля задержки мощности, следовательно, увеличение скорости спада профиля требует уменьшения интервала дискретизации.

На рис. 5-6 показаны графики вероятности битовой ошибки от ОСШ для различных значений порядка доплеровского фильтра для двух значений отношения ширины доплеровского спектра  $\Delta F_d$  к ширине полосы СПИ  $\Delta F$ .

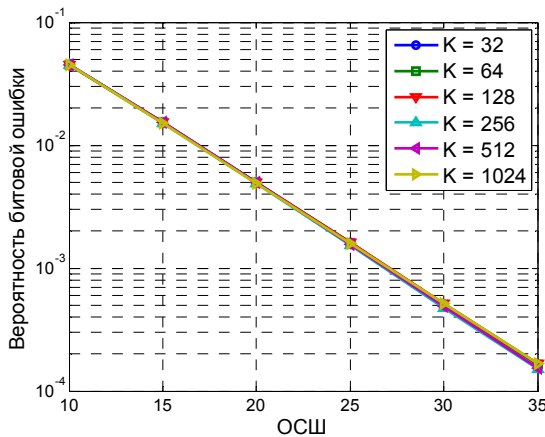


Рис. 5 Вероятности битовой ошибки от ОСШ при  $\frac{\Delta F_d}{\Delta F} = 0,001$

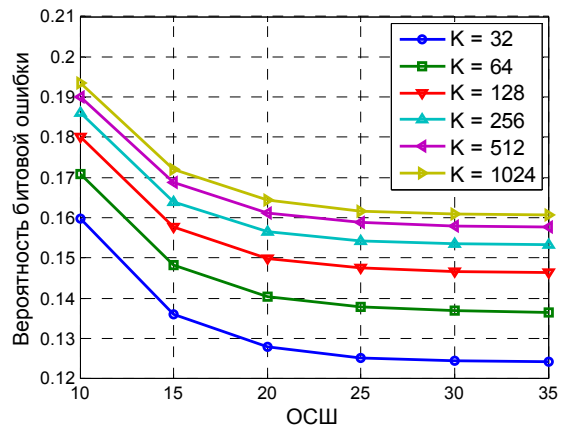


Рис. 6 Вероятность битовой ошибки от ОСШ при  $\frac{\Delta F_d}{\Delta F} = 0,2$ .

Увеличение порядка ДФНЧ с одной стороны позволяет точнее воспроизводить форму доплеровского спектра многолучевого радиоканала, а с другой стороны требует существенного увеличения вычислительных затрат.

Критерий выбора оптимального значения порядка ДФНЧ, как и в случае с выбором оптимального количества лучей, определяется выражением (2), в роли аргумента в данном случае выступает порядок ДФНЧ  $K$ . Таким образом, оптимальным значением порядка ДФНЧ является значение аргумента  $\hat{K}$ , которое максимизирует функцию  $F(K)$ , характеризующую эффективность использования вычислительных ресурсов, необходимых для реализации ДФНЧ.

На рис. 7 приведена зависимость вероятности битовой ошибки от порядка фильтра при  $\frac{\Delta F_D}{\Delta F} = 0,2$ , на рис. 8 – функция  $F(K)$ .

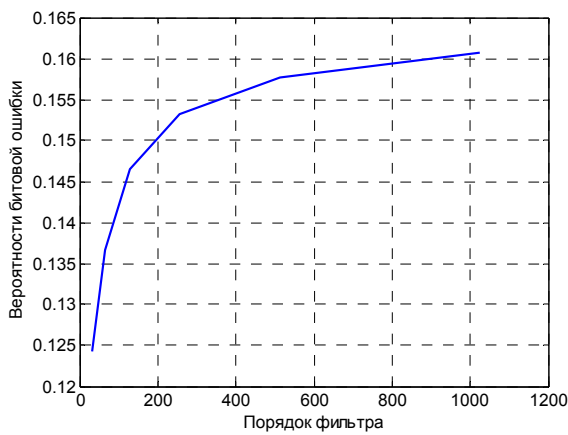


Рис. 7 Зависимость вероятности битовой ошибки от  $K$  при  $\frac{\Delta F_D}{\Delta F} = 0,2$ .

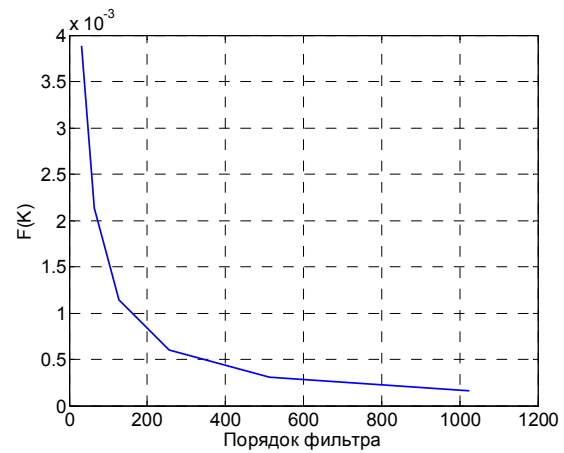


Рис. 8 Функции  $F(K)$  при  $\frac{\Delta F_D}{\Delta F} = 0,2$ .

Полученные результаты можно использовать для оценки необходимых вычислительных затрат и выбора соответствующей элементной базы для реализации аппаратного имитатора.

**В третьей главе** диссертации рассматривается вопрос выбора элементной базы для реализации аппаратного ИМП с поддержкой режима реального времени. Приводится описание архитектуры реализованного имитатора с оценкой необходимых вычислительных ресурсов.

В качестве элементной базы использована микросхема ПЛИС фирмы XILINX семейства VIRTEX6, входящая в состав отладочного комплекта XILINX VIRTEX 6 FPGA ML 605 Evaluation Kit (см. рис. 9). В качестве аналого-цифрового преобразователя использован АЦП фирмы Texas Instruments ADC083000. В качестве цифро-аналогового преобразователя использован ЦАП фирмы Analog Devices AD9739. Тактирование всей системы осуществляется синтезатором частоты (СЧ)

фирмы Analog Devices ADF4350. АЦП, ЦАП и СЧ установлены на плату ADA605 (см. рис. 10).

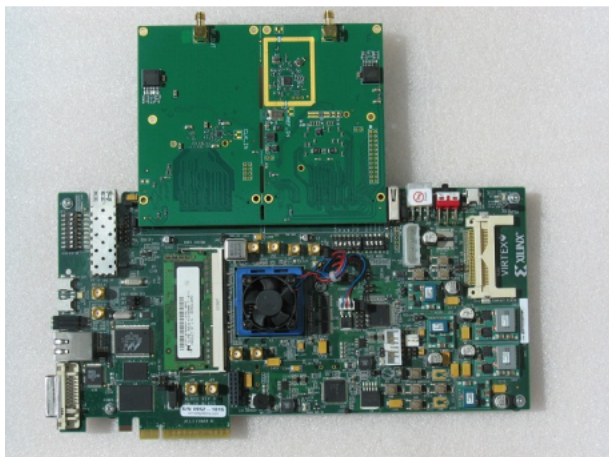


Рис. 9 Отладочная плата ЦОС Xilinx ML605 с модулями АЦП и ЦАП.

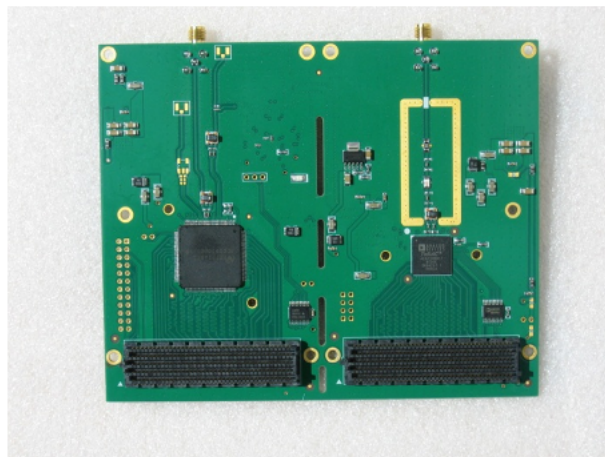


Рис. 10 Плата ADA605 с АЦП, ЦАП и СЧ.

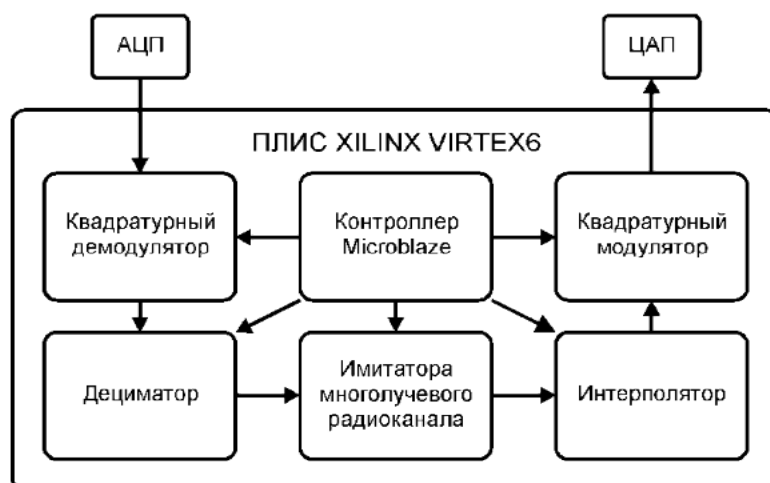


Рис. 11 Схема реализации имитатора на ПЛИС.

Структурная схема реализации имитатора на ПЛИС приведена на рис. 11. Оригинальным техническим решением является применение широкополосных АЦП и ЦАП, которые позволяют обрабатывать радиосигналы в диапазоне от 10 до 3000 МГц, что позволяет отказаться от использования аналоговых преобразователей частоты. Цифровая обработка может производиться над сигналом на радиочастоте с шириной полосы до 130 МГц с частотой дискретизации 2,5 ГГц. Из сигнала, поступающего с АЦП, квадратурным демодулятором на нулевой частоте выделяются синфазная и квадратурная компоненты. Далее квадратуры поступают на управляемый дециматор, повышающий период дискретизации сигнала. Затем сигнал следует на имитатор многолучевого канала (см. рис. 1). Сигнал, прошедший

многолучевой канал, интерполируется и подается на квадратурный модулятор, где происходит обратный перенос на радиочастоту и ЦАП. Управление процессом моделирования осуществляется контроллером Microblaze. Данная схема может быть полностью реализована с применением одной ПЛИС Xilinx Virtex 6.

В четвертой главе приведены методики и результаты исследования и верификации реализованного экспериментального образца ИМР. Исследования производились с применением двух разных подходов.

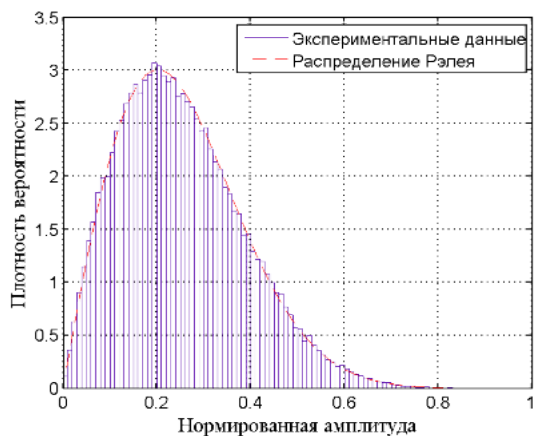


Рис. 12 Распределение мгновенных значений амплитуды луча.

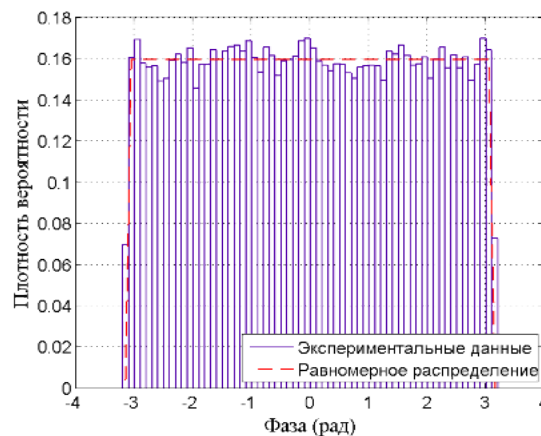


Рис. 13 Распределение мгновенных значений фазы луча.

В рамках 1-го подхода напрямую исследовались собственные статистические, спектральные и временные характеристики имитатора. Исследования производились с применением современного радиоизмерительного оборудования: анализатора спектра Agilent N9030a, цифрового осциллографа Agilent Infinium MSO9104A, генератора сигналов Agilent E8257D.

В соответствии со статистической моделью распределения мгновенных значений амплитуды каждого луча должно описываться распределением Рэлея (см. рис. 12), фазы – равномерным распределением (см. рис. 13).

Исследование спектральных характеристик показало полное соответствие требованиям, заложенным в процессе разработки. На рис. 14 приведен снимок спектра сигнала на выходе имитатора при подаче гармонического сигнала на вход. На рис. 15 приведено сравнение этого спектра с теоретическим графиком спектральной плотности мощности для спектра Джейкса с максимальной доплеровской частотой равной 300 Гц.



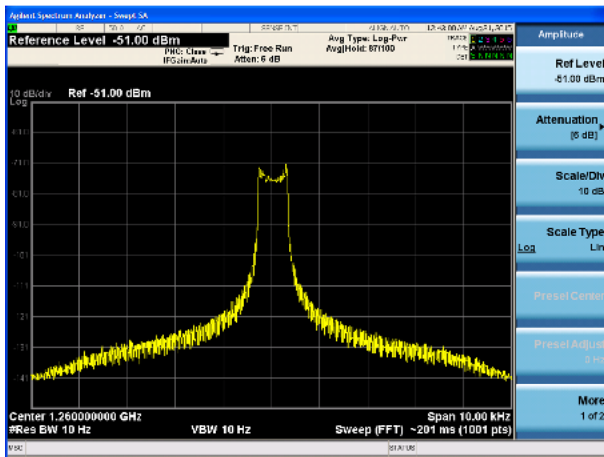


Рис. 14 Доплеровский спектр на частоте 1260 МГц.

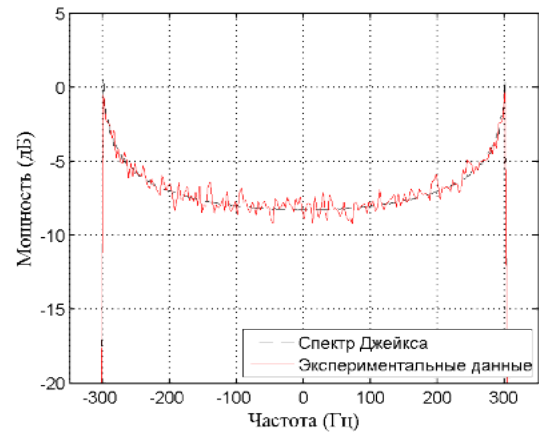


Рис. 15 Доплеровский спектр отдельного луча.

Исследование характеристик имитатора во временной области показало, что отклонение формы импульсной характеристики канала воспроизводимой имитатором от расчетной не превышает 0,5 дБ. Пример импульсной характеристики имитатора приведен на рис. 16.

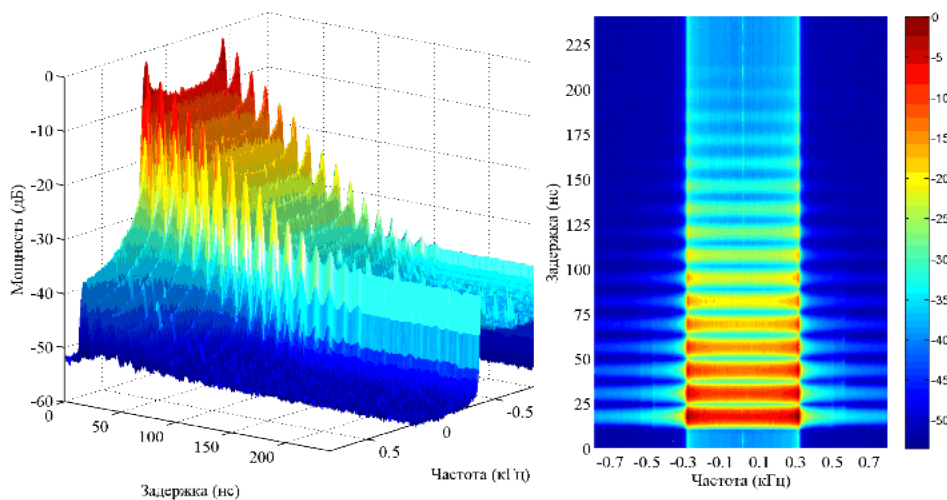


Рис. 16 . Пример импульсной характеристики имитатора.

Другой подход к верификации макета имитатора заключается в исследовании качества работы имитатора на примере реальной БСПИ и сравнении известных теоретических результатов для различных радиоканалов с полученными в ходе эксперимента.

Выбранная широкополосная система радиосвязи использует DBPSK модуляцию, ширина спектра радиосигнала – примерно 130 МГц (по главному

лепестку). Система рассчитана для работы в L-диапазоне, спектр сигнала на выходе передатчика показан на рис. 17.

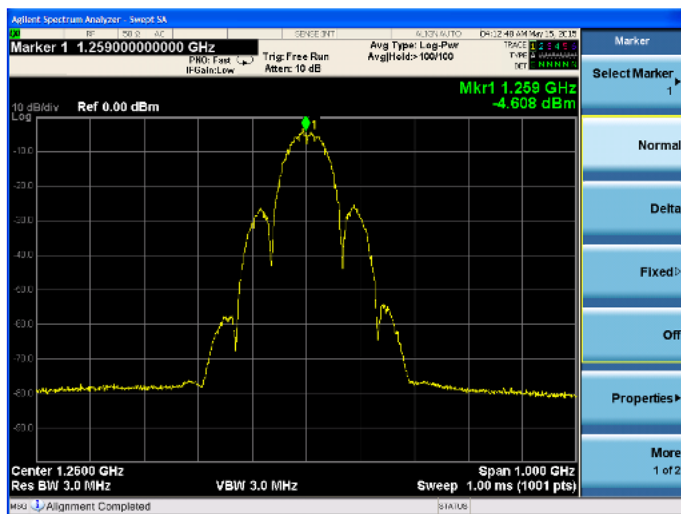


Рис. 17 Спектр сигнала на выходе передатчика.

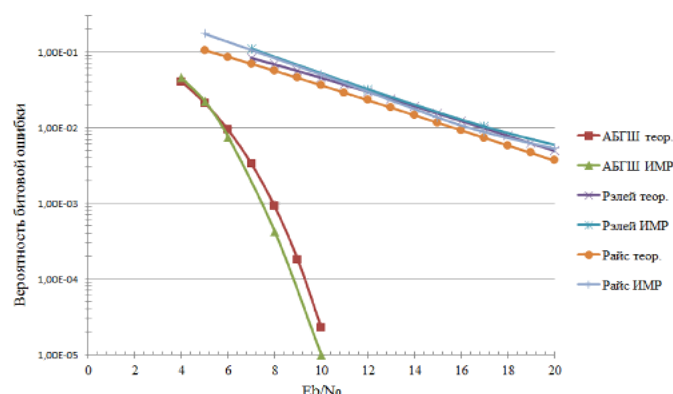


Рис. 18 Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей вероятности битовой ошибки от  $E_b/N_0$ .

На рис. 19 показаны результаты исследования данной системы радиосвязи в радиоканалах с АБГШ, с рэлеевскими и райсовскими замираниями воспроизводимых на макете имитатора. Сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими для выбранного типа модуляции, показал, что расхождение не превышает значения в 1 дБ, что может быть списано на погрешность эксперимента. Совпадение результатов испытаний системы связи на имитаторе многолучевого радиоканала с теоретическими данными позволяет говорить об адекватности моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке и оптимизации вычислительных ресурсов широкополосного имитатора многолучевого радиоканала с частотно-временным рассеянием. Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующим положениям:

1. Разработан принцип построения аппаратного имитатора многолучевого радиоканала, учитывающий, как свойства радиоканала, так и характеристики радиосигнала системы радиосвязи. Применение данного принципа позволяет адекватно воспроизводить свойства многолучевого радиоканала с высокой

эффективностью использования вычислительных ресурсов в режиме реального времени.

2. Применение критерия оптимизации интервала дискретизации комплексной импульсной характеристики радиоканала позволяет в 2 раза снизить вычислительные затраты имитатора, по сравнению с классическим подходом к выбору интервала дискретизации импульсной характеристики для случаев длинного профиля задержки мощности. Для случая короткого профиля задержки мощности, вычислительные затраты возрастают в 2-4 раза, по сравнению с классическим подходом, однако, за счет более короткого интервала дискретизации повышается адекватность моделирования. В то же время последний сценарий не является определяющим с точки зрения общего количества необходимых ресурсов для реализации имитатора.

3. Порядок доплеровского фильтра, при физически реализуемых значениях отношения ширины доплеровского спектра к ширине полосы радиосигнала  $\frac{\Delta F_D}{\Delta F}$ , оказывает незначительное влияние на энергетическую эффективность исследуемой системы передачи информации, что позволяет отказаться от использования фильтров высоких порядков, и тем самым снизить вычислительные затраты имитатора. Как показывает расчет, экономия вычислительных ресурсов может составлять более чем в 20 раз (при сравнении фильтра 32-го порядка с фильтром 1024-го порядка).

4. Применение высокоскоростных АЦП и ЦАП позволяет отказаться от использования аналоговых преобразователей частоты в диапазоне частот до 3 ГГц. Данное решение позволяет повысить универсальность имитатора, избавиться от различных искажений сигнала, вносимых аналоговым трактом.

5. По результатам экспериментальных исследований можно сделать заключение, что разработанный экспериментальный образец имитатора широкополосного радиоканала с частотно-временным рассеянием полностью соответствует тем математическим моделям, которые были заложены в него в процессе проектирования.

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

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Казаков Л.Н., Соловьев Д.М. Оптимизация вычислительных ресурсов имитатора мобильного городского многолучевого радиоканала. // Электросвязь. 2016. № 4. С. 49-56.
2. Казаков Л.Н., Соловьев Д.М. Оптимизация вычислительных ресурсов имитатора широкополосного городского многолучевого радиоканала. // Электросвязь. 2015. № 5. С. 24-27.
3. Gerasimov A.V., Solovyev D.M. An efficient use of DAC dynamic range in frequency-selective channel simulator // T-Comm Телекоммуникации и транспорт ТОМ 9. №1-2015. С. 90-92.
4. Герасимов А.Б., Соловьев Д.М. Реализация на ПЛИС имитатора многолучевого канала высокоскоростной мобильной радиосвязи // Электросвязь. 2014. № 5. С. 34-39.
5. Герасимов А.Б., Казаков Л.Н., Кренин А.Н., Соловьев Д.М. Реализация на программируемой логической интегральной схеме имитатора городского многолучевого канала высокоскоростной мобильной радиосвязи // Вестник ЯЗРИ ПВО. 2014. №4. С. 76-86.
6. Алгоритм подавления многократных ответных импульсных помех обзорным радиолокационным станциям и его реализация в комплексе полунатурного моделирования // Вестник ВУНЦ ВВС «ВВА» (филиал г. Ярославль). 2012. №14. С. 50-55.

### Патент на полезную модель:

7. Герасимов А.Б., Кренин А.Н., Погребной Д.С., Соловьев Д.М., Селянская Е.А. Программно-аппаратный комплекс с нефиксированной конфигурацией для моделирования радиотехнических систем // Патент России № 128046. 2013. Бюл. № 13.

### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

8. Соловьев Д.М. Программный файл «Цифровой когерентный модем фазоманипулированных сигналов». Свидетельство № 2012613902. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.04.2012.
9. Соловьев Д.М. Программный файл «Цифровой имитатор многолучевого канала для высокоскоростных систем авиационной радиосвязи». Свидетельство № 2013615936. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.06.2013.

### Другие статьи и материалы конференций

10. Соловьев Д.М., Скороходов Е.А. Полунатурное моделирование многофункциональной БРЛС в режиме обнаружения // Сборник трудов международной научно-технической конференции «СИНХРОИНФО 2014». – Воронеж, 2014. – С. 125-127.
11. Герасимов А.Б., Соловьев Д.М. Эффективное использование динамического диапазона ЦАП в имитаторе канала с частотно-селективными замираниями // Сборник трудов международной научно-технической конференции «СИНХРОИНФО 2014».

12. Казаков Л.Н., Кренев А.Н., Соловьев Д.М. Оптимизация использования вычислительных ресурсов имитатора многолучевого радиоканала. // Доклады международной молодежной научно-практической конференции “Путь в науку”, – Ярославль, 2014. – С. 55.

13. Казаков Л.Н., Соловьев Д.М. Расчет параметров городского многолучевого радиоканала. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2014. Вып. 4. С. 29-36.

14. Герасимов А.Б., Соловьев Д.М. Реализация на ПЛИС имитатора многолучевого радиоканала с частотно-селективными замиряниями. // Доклады международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий REDS-2014», Москва, 2014 г.

15. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Соловьев Д.М. Цифровой имитатор радиоканала с частотно-селективными замиряниями. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2014. Вып. 1. С. 55-59

16. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Соловьев Д.М. Реализация на ПЛИС имитатора многолучевого канала высокоскоростной мобильной радиосвязи. // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и других стран мира, сравнительный анализ», Ярославль 2013

17. Кренев А.Н., Туров В. Е., Соловьев Д.М., Селянская Е. А. Полунатурное моделирование динамического поля сигналов электромагнитной обстановки. // Синхроинфо 2013.

18. Кренев А.Н., Селянская Е.А., Туров В.Е., Соловьев Д.М. Полунатурное моделирование динамического поля сигналов электромагнитной обстановки. Сборник докладов международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях СИНХРОИНФО 2013».

19. Вишняков Д.Ю., Герасимов А.Б., Казаков Л.Н., Кренев А.Н., Соловьев Д.М., Царев А.Б. Комплекс полунатурного моделирования системы высокоскоростной радиосвязи в радиоканале земля-самолет. // Синхроинфо 2013.

20. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Соловьев Д.М., Скороходов Е.А. Полунатурная модель радиолокатора. // Труды XIII Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития и применения средств ПВО в современных условиях», Ярославль 2012.

21. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Погребной Д.С., Соловьев Д.М., Селянская Е.А. Комплекс полунатурного моделирования в задачах авиационной радиосвязи. // Труды XIII

Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития и применения средств ПВО в современных условиях», Ярославль 2012.

22. Герасимов А.Б., Соловьев Д.М. Комплекс полунатурного моделирования систем радиосвязи с нефиксированной конфигурацией. // Сборник докладов IV международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». Москва 2012.

23. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Погребной Д.С., Селянская Е.А., Соловьев Д.М. Комплекс полунатурного моделирования систем радиосвязи с нефиксированной конфигурацией. Сборник докладов международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях СИНХРОИНФО 2012».

24. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Погребной Д.С., Соловьев Д.М., Селянская Е.А. Комплекс полунатурного моделирования систем радиосвязи с нефиксированной конфигурацией. // 14-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2012», Москва, Россия

25. Герасимов А.Б., Кренев А.Н., Погребной Д.С., Соловьев Д.М., Селянская Е.А. Комплекс полунатурного моделирования систем радиосвязи. // 12-ая Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения», 14 октября 2011 года: сборник докладов ВУНЦ ВВС «ВВА».

26. Соловьев Д.М., Чернов С.И. Реализация системы слежения по фазе и частоте радионавигационного приемника на основе ПЛИС XILINX SPARTAN-3A DSP. Всероссийская научно-практическая конференция 3-4 ноября 2010 г «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения», Сборник докладов в 2-х частях, часть II, стр. 322, Ярославль, 2010.

27. Соловьев Д.М., Чернов С.И. Реализация системы слежения по фазе и частоте радионавигационного приемника на основе ПЛИС XILINX SPARTAN-3A DSP. Международный научно-тех. семинар "Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания", "Синхроинфо 2011", Украина, Одесса, 2011.

28. Соловьев Д.М., Чернов С.И. Реализация системы слежения по фазе и частоте радионавигационного приемника на основе ПЛИС Xilinx Spartan-3A DSP. Сборник докладов. 13-ой Международ. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2011", Москва. Т.2.

29. Соловьев Д.М., Палей Д. Э. Цифровая адаптивная система слежения за фазой и частотой сигнала на базе ПЛИС XILINX SPARTAN-3A DSP. Вестник ЯрГУ. Серия Естественные и технические науки. - Ярославль: Издательство ЯрГУ. 2011.