

*На правах рукописи*



**Покровский Павел Сергеевич**

ПРОЦЕДУРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ К МЕШАЮЩИМ ФАКТОРАМ  
РАДИОСИГНАЛОВ С УПРАВЛЯЕМОЙ СВЯЗЬЮ МЕЖДУ КВАДРАТУРНЫМИ  
СОСТАВЛЯЮЩИМИ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Специальность: 05.12.04 -  
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

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

Рязань 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

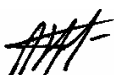
- Научный руководитель - заслуженный работник ВШ РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Кириллов Сергей Николаевич
- Официальные оппоненты - Кошелев Виталий Иванович,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехнических систем  
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет»
- Гусев Сергей Игоревич,  
кандидат технических наук,  
главный специалист,  
филиал ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» -  
ОКБ «Спектр»
- Ведущая организация - ОАО «Российские космические системы»  
(г. Москва)

Защита состоится «18» мая 2012 г. в 12 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный  
радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «16 » апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



А.Г. Борисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В связи с широким распространением беспроводных систем передачи информации (СПИ) для обеспечения электромагнитной совместимости приходится разрабатывать новые спектрально эффективные виды радиосигналов. Большой вклад в развитие данного вопроса внесли отечественные и зарубежные ученые Я.Д. Ширман, Л.Е. Варакин, Д.Е. Вакман, Р.М. Седлецкий, Л.С. Гуткин, С.Б. Макаров, К. Шеннон, Г. Ван Трис, Ч. Кук, М. Бернфельд, Л. Френкс и др.

В радиопередающих устройствах сужение полосы частот приводит к возникновению флуктуаций огибающей радиосигнала, что снижает энергетическую эффективность радиоканала. Для обеспечения компромисса между требованиями повышения спектральных и энергетических характеристик разработаны GMSK- и FQPSK- сигналы, использующие связь между синфазной и квадратурной составляющими комплексной огибающей.

Данные виды модуляции являются узко специализируемыми, то есть предназначены для применения в определенных условиях, что требует разработки уникальных приемопередающих модулей. Подобный подход ограничивает свойства адаптации радиотракта СПИ к особенностям характеристик радиоканала. Поэтому при проектировании гибких программно-управляемых СПИ приходится расширять номенклатуру функциональных узлов, закладывая несколько модуляторов и демодуляторов, включаемых в зависимости от текущих условий. Таким образом, для снижения стоимости и массогабаритных показателей современных СПИ актуальна разработка единого универсального программно-управляемого формирователя радиосигналов, способного, в частности, генерировать FQPSK- и GMSK- сигналы.

Отмеченная выше узкая специализация современных спектрально эффективных видов модуляции не позволяет создать универсальный радиосигнал для всех областей применения, так как каждому приложению соответствуют свои зачастую противоречивые требования к ширине полосы частот и уровню флуктуаций огибающей. Поэтому в целях создания универсальной системы актуальна задача разработки процедуры двухкритериального синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающей заданные спектральные и энергетические характеристики. Данный подход позволит получать новые виды радиосигналов, комбинируя различные свойства известных типов модуляции.

В настоящее время при функционировании СПИ в сложной сигнально-помеховой обстановке (ПО) используют шумоподобные сигналы, обеспечивающие высокую по сравнению с простыми радиосигналами помехоустойчивость и скрытность радиолинии. Для данных сигналов на кафедре радиоуправления и связи РГРТУ получены алгоритмы синтеза расширяющих кодовых последовательностей (КП), позволяющие повысить устойчивость сигналов с двоичной фазовой манипуляцией и модуляцией минимальным частотным сдвигом к действию узкополосных и структурных помех. Полученные процедуры и алгоритмы не могут быть непосредственно использованы при формировании КП для FQPSK- и GMSK-сигналов. В связи с этим актуальна задача разработки процедур адаптации к действующим помехам расширяющей КП для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими и, в частности, для GMSK- и FQPSK-сигналов.

**Цель работы.** С учетом вышеизложенного целью данной работы является разработка двухкритериальных процедур формирования спектрально и энергетически эффективных видов радиосигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими для адаптации к мешающим факторам СПИ.

Поставленная цель работы требует решения следующих задач:

1 Разработать процедуру формирования радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими на основе последовательностей «зависимых» импульсов для семейств СРМ- и FQPSK-сигналов.

2 Получить и проанализировать аналитические зависимости для расчета спектра, а также спектральных и энергетических характеристик радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими.

3 Обосновать комбинированный критерий качества, учитывающий требования к характеристикам спектральной и энергетической эффективности радиолинии, а также разработать процедуру синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими.

4 Провести анализ помехоустойчивости с учетом заданных требований к занимаемой полосе частот и уровню флуктуаций огибающей, а также разработать структуру оптимального приемника на основе представления радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими посредством конечного автомата.

5 Разработать эффективную процедуру расчета спектра радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими на основе структурных особенностей данного класса модуляции при четырехфазной передаче бинарного информационного потока в режиме прямого расширения спектра.

6 Обосновать комбинированный критерий приближения, регуляризирующий задачу приближения к «эталонному» спектру за счет дополнительных ограничений, накладываемых на автокорреляционную функцию (АКФ) сигнала, и выбрать процедуру оптимизации расширяющей КП для синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающих за счет структурных особенностей дополнительное подавление действующих гармонических и узкополосных помех.

7 Обосновать возможность реализации универсального формирователя радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими на основе современной элементной базы, включающей цифровой сигнальный процессор (ЦСП) и микросхему цифрового синтеза сигналов (МЦСС).

8 Проанализировать устойчивость к разрядности представления операндов разрабатываемых процедур адаптивного к действующим помехам синтеза радиосигналов при аппаратно-программной реализации на основе ЦСП и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

**Методы проведения исследований.** В ходе работы использовались методы функционального и спектрального анализа, статистической радиотехники, а также вариационного исчисления. Перечисленные теоретические методы сочетались с имитационным моделированием и натурными испытаниями на основе действующего макета универсального формирователя радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы получены новые научные результаты:

1 Предложено общее представление GMSK- (при  $BT_b \in [0,26; 0,6]$ ) и FQPSK-сигналов на основе радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающее ошибку приближения по углу не более  $5^\circ$ , а по амплитуде не более 0,5 дБ. При этом обеспечивается уменьшение первых боковых лепестков спектральной плотности мощности (СПМ) на 3 дБ и более в случае GMSK-

сигналов и увеличение скорости спада внеполосного излучения на 20 дБ/дек в случае FQPSK-сигналов.

2 Получены в аналитическом виде выражения для частотного спектра, спектральных и энергетических характеристик, а также помехоустойчивости радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими.

3 Разработана процедура синтеза по комбинированному критерию качества радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, позволяющая варьировать полосу частот радиосигнала в пределах 28 %, а уровень флуктуаций огибающей – до 1,9 дБ.

4 Разработана эффективная процедура расчета СПМ радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими при реализации четырехфазной передачи двоичного информационного потока в режиме GMSK- и FQPSK-сигналов, обеспечивающая сокращение вычислительных затрат в 2 раза по сравнению с математическим моделированием.

5 Разработана процедура двухкритериального, адаптивного к текущей ПО синтеза КП для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающая дополнительное по сравнению с применением псевдослучайных последовательностей (ПСП) той же длины подавление помех с ограниченным спектром (ПОС) на 9 дБ, узкополосных – на 11 дБ и гармонических – на 25 дБ и более.

**Достоверность.** Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и выводов обеспечивается качественным и количественным сопоставлением результатов имитационного моделирования с известными положениями теории обработки сигналов. Кроме того, адекватность приведенных аналитических выражений для расчета спектральных и энергетических характеристик радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, а также реализуемость разработанного универсального формирователя GMSK- и FQPSK- сигналов подтверждаются результатами проведенного в третьей главе эксперимента на макете.

**Практическая ценность.** Разработанный программно-управляемый универсальный формирователь GMSK- и FQPSK-сигналов может быть использован в современных и перспективных СПИ, так как является совместимым с рядом стандартов мобильной, спутниковой и космической связи. Предложенные процедуры двухкритериального, адаптивного к действующей ПО синтеза КП для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими при внедрении в перспективные СПИ позволят повысить электромагнитную совместимость и помехозащищенность радиолиний в условиях динамично изменяющихся мешающих факторов.

Результаты диссертационной работы нашли применение в действующей аппаратуре ОАО «Российские космические системы», что подтверждено соответствующим актом о внедрении, а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

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

1 Двухкритериальная процедура синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими для получения требуемых спектральных и энергетических характеристик СПИ, позволяющая варьировать полосу частот радиосигнала в пределах 28 %, а уровень флуктуаций огибающей – до 1,9 дБ.

2 Двухкритериальная процедура адаптивного к текущей ПО синтеза КП для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечи-

вающая дополнительное по сравнению с применением ПСП той же длины подавление ПОС на 9 дБ, узкополосных – на 11 дБ и гармонических – на 25 дБ и более.

3 Универсальный формирователь радиосигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими, в частности для GMSK- и FQPSK-сигналов, обеспечивающий в случае GMSK уменьшение на 3 дБ уровня первых боковых лепестков СПМ и увеличение скорости спада внеполосного излучения на 20 дБ/дек для FQPSK.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1 15-я и 16-я международные научно-технические конференции «Проблемы передачи информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2008, 2010 гг.

2 34-я всероссийская научно-техническая конференция «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды». Рязань, 2009 г.

3 14-я, 15-я и 16-я всероссийские научно-технические конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». Рязань, 2009, 2010, 2011 гг.

4 Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Биотехнические, медицинские, экологические системы и комплексы». Рязань, 2009 г.

5 12-я и 13-я международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2010, 2011 гг.

6 9-я международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2011)». Владимир, 2011 г.

7 4-я всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва, 2011 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ. Среди них 2-е статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций, 1-а статья в межвузовском сборнике, 12 тезисов докладов на конференциях, а также 2-а научно-технических отчета по НИР.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 103-х наименований и 3-х приложений. Диссертация содержит 199 страниц, в том числе 126 страниц основного текста, и 58 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы; определены цели и задачи, рассматриваемые в диссертационной работе. Перечислены новые научные результаты, полученные в данной работе; представлены её практическая ценность и апробация; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** предложено представление современных спектрально эффективных FQPSK- и СРМ- сигналов, в частности GMSK-сигналов, на основе управляемой связи между синфазной и квадратурной составляющими комплексной огибающей, позволяющее в аналитическом виде получить выражения для расчета СПМ, характеристик спектральной и энергетической эффективности, а также помехоустойчивости. С использованием двухкритериального подхода разработана процедура синтеза

радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими по заданным показателям качества.

С целью обобщения классов СРМ- и FQPSK-сигналов предложены радиосигналы с управляемой связью между синфазной и квадратурной составляющими, которые описываются выражениями

$$I_{H2}(t) = I_1(t) - a_1 I_2(t) - a_2 I_3(t), \quad Q_{H2}(t) = Q_1(t) - a_1 Q_2(t) - a_2 Q_3(t); \quad (1)$$

где  $I_1(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_{1i} p_1(t - iT_s)$ ,  $Q_1(t) = \sum_{i=0}^{N-1} d_{Q1i} p_1(t - iT_s - T_s/2)$  - составляющие OQPSK-сигнала, образованного на основе импульса  $p_1(t) = \sin^2(0,5\pi t / T_s) \cdot \text{rect}(0,5t / T_s)$ ;

$I_2(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} d_{2i} p_2(t - iT_s)$ ,  $Q_2(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} d_{Q2i} p_2(t - iT_s - T_s/2)$  - составляющие OQPSK-сигнала с элементарным импульсом  $p_2(t) = \sin^2(\pi t / T_s) \cdot \text{rect}(0,5t / T_s)$ ;

$I_3(t) = \text{sign}(I_{S1}(t)) \cdot |Q_2(t)|$ ,  $Q_3(t) = \text{sign}(Q_{S1}(t)) \cdot |I_2(t)|$  - составляющие межканальной связи;  $a_1, a_2$  - коэффициенты управляемой связи между квадратурными составляющими,  $T_s$  - период следования информационных символов. На рисунке 1 представлено устройство универсального формирователя радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими (УФРУМС), реализующего выражения (1).

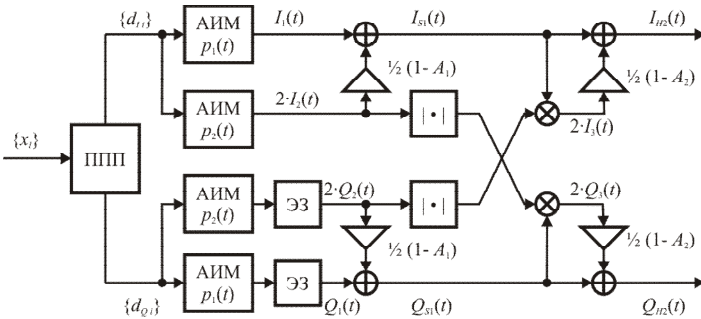


Рисунок 1

Здесь ППП – последовательно-параллельный преобразователь, АИМ – амплитудно-импульсный модулятор, ЭЗ – элемент задержки, треугольным блоком показан усилительный элемент,  $\oplus$  – блок арифметического сложения,  $\otimes$  – блок арифметического умножения,  $|\cdot|$  – операция взятия модуля аргумента,  $A_1, A_2 \geq 0$  – управляющие параметры, связанные с коэффициентами  $a_1, a_2$  через формулы:  $a_1 = 1 - A_1$ ,  $a_2 = 1 - A_2$ .

В ходе исследований были получены зависимости коэффициентов разработанной схемы при реализации FQPSK- и GMSK-сигналов от управляющих параметров оригинальных формирователей данных видов модуляции  $A_{F2}$  и  $BT_b$  соответственно:

$$A_1(A_{F2}) = 0,011 + 0,989 A_{F2}, \quad A_2(A_{F2}) = -0,068 + 1,068 A_{F2}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_1(BT_b) &= \cos\left(\frac{1}{2}\pi(\operatorname{erf}(\alpha_M BT_b) + (\exp(-(\alpha_M BT_b)^2) - 1) / (\sqrt{\pi}\alpha_M BT_b))\right), \\ A_2(BT_b) &= \sin\left(\frac{1}{2}\pi(\operatorname{erf}(\alpha_M BT_b) + (\exp(-(\alpha_M BT_b)^2) - 1) / (\sqrt{\pi}\alpha_M BT_b))\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha_M = 5,336$ .

Предложенные зависимости позволяют формировать с ошибкой менее допустимой для космических систем передачи информации радиосигналы с FQPSK и GMSK при  $BT_b \in [0,26; 0,6]$ . Таким образом, возможно внедрение разработанного УФРУМС в существующие СПИ без модернизации других узлов.

С целью теоретического исследования свойств и синтеза устройств детектирования радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими получено аналитическое выражение для расчета СПМ:

$$G(\omega) \approx \frac{1}{2T_S} \left( \left( \frac{\sin(\omega - \omega_0)T_S}{(\omega - \omega_0)} \left( \frac{1}{1 - ((\omega - \omega_0)T_S / \pi)^2} - \frac{(1 - A_1) + \frac{1}{2}(1 - A_2) / \cos(\frac{1}{2}T_S / \pi(\omega - \omega_0))}{2(1 - ((\omega - \omega_0)\frac{1}{2}T_S / \pi)^2)} \right) \right)^2 + \left( \frac{\frac{1}{2}(1 - A_2) \sin(\frac{1}{2}(\omega - \omega_0)T_S)}{(\omega - \omega_0)(1 - ((\omega - \omega_0)\frac{1}{2}T_S / \pi)^2)} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – несущая радиальная частота.

Анализ выражения показывает, что радиосигналы с управляемой связью между квадратурными составляющими вне зависимости от реализуемого вида модуляции характеризуются скоростью спада внеполосного излучения 60 дБ/дек. Таким образом, использование УФРУМС при генерации FQPSK-сигналов позволяет обеспечить выигрыш по сравнению с оригинальной схемой FQPSK-модулятора в скорости спада внеполосного излучения на 20 дБ/дек. Проведенные исследования показали, что при формировании GMSK-сигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими удастся добиться сокращения уровня первых боковых лепестков СПМ более чем на 3 дБ.

С целью проведения двухкритериального синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими обоснована целевая функция вида:

$$J_4(A_1, A_2) = \lambda_2 (\beta_3(A_1, A_2)T_S)^2 + (1 - \lambda_2)J_3(A_1, A_2), \quad (5)$$

где  $\lambda_2 \in [0; 1]$  – весовой коэффициент,  $\beta_3 T_S$  – нормированная эффективная полоса частот сигнала,  $J_3(A_1, A_2)$  – функционал, численно равный дисперсии мгновенной мощности сигнала и косвенно влияющий на уровень флуктуаций огибающей.

Путем оптимизации целевой функции (5) получены частные решения задачи синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающие в данном классе минимум эффективной полосы частот ( $A_1 = 1,461$ ,  $A_2 = 1,123$ ) и минимум флуктуаций огибающей ( $A_1 = 0,594$ ,  $A_2 = 0,811$ ). Показано, что применение сигналов с минимальной эффективной полосой частот позволяет на 5 % сократить полосу частот по сравнению с T-OQPSK-сигналами и обеспечить наилучшее в классе радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими сочетание спектральной эффективности и помехоустойчивости радиолнии.



На основе общего решения задачи минимизации функции (5) получены спектральные и энергетические характеристики, соответствующие множеству синтезированных сигналов и представленные на рисунке 2 в виде зависимости нормированной полосы частот  $\Delta F_{99}T_S$ , в которой сосредоточено 99 % мощности радиосигнала, от уровня пик-фактора  $\Pi$ . На рисунке 3 приведены зависимости параметров радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими от уровня флуктуаций огибающей.

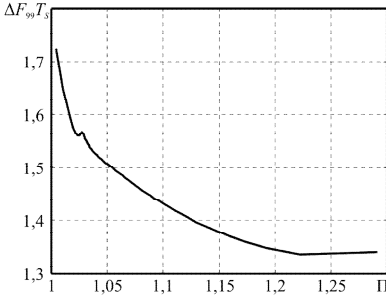


Рисунок 2

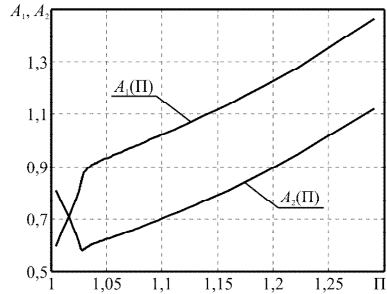


Рисунок 3

Таким образом, процедура двухкритериального синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими для получения требуемых спектральных и энергетических характеристик СПИ включает следующие этапы:

1) по характеристике, представленной на рисунке 2, определяются значения нормированной полосы частот  $\Delta F_{99}T_S$  и уровня пик-фактора  $\Pi$ , которые удовлетворяют предъявляемым требованиям к радиосигналам;

2) на основе зависимостей  $A_1(\Pi)$  и  $A_2(\Pi)$  (см. рисунок 3) определяются искомые значения управляющих параметров УФРУМС.

С целью сравнения радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими по помехоустойчивости с известными классами радиосигналов получена аналитическая формула для расчета потенциальной вероятности битовой ошибки для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ):

$$P_e = \frac{1}{4}(\operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha_{\rho 1}} \cdot E_b / N_0) + \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha_{\rho 2}} \cdot E_b / N_0)), \quad (6)$$

где  $E_b$  - энергия сигнала, приходящаяся на один бит,  $N_0$  - СПМ АБГШ,  $\alpha_{\rho 1}$  и  $\alpha_{\rho 2}$  - коэффициенты, определяемые выражениями:

$$\alpha_{\rho 1} = \frac{\frac{3}{8}a_1^2 + (\frac{1}{4}a_2 - 1)a_1 + 1,5 + \frac{9}{8}a_2^2 - (1 + \frac{8}{3\pi})a_2}{\frac{1}{8}a_1a_2 + \frac{3}{8}(a_1^2 + a_2^2) + 1,5 - a_1 - 0,924a_2}, \quad \alpha_{\rho 2} = \frac{3 - 2a_1 + \frac{3}{4}(a_1^2 + a_2^2)}{\frac{1}{8}a_1a_2 + \frac{3}{8}(a_1^2 + a_2^2) + 1,5 - a_1 - 0,924a_2}.$$

Проведенные исследования показали, что в частных случаях полученная формула с ошибкой менее 0,05 дБ повторяет вероятностные характеристики для Т-ОQPSK-, FQPSK- и GMSK-сигналов, приведенные в известной литературе. Анализ помехоустойчивости синтезированных радиосигналов показал, что применение в СПИ управляемой связи между квадратурными составляющими обеспечивает помехоустойчивость на уровне современных спектрально эффективных видов модуляции, таких как CPM и FQPSK.

В интересах разработки единого устройства детектирования радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими был рассмотрен УФРУМС как конечный автомат, состояние которого определяется предшествующими  $\theta_i = \{d_{Ii-1}, d_{Qi-2}, d_{Qi-1}\}$ , а переход – текущими  $d_{Ii}$ ,  $d_{Qi}$  информационными символами синфазного и квадратурного каналов. Показано, что в случае канала с АБГШ оптимальным по критерию максимума апостериорной вероятности алгоритмом приема радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими является алгоритм Витерби. На рисунке 4 представлена структурная схема устройства, реализующего данный подход, где  $I^*(t), Q^*(t)$  – синфазная и квадратурная составляющие смеси АБГШ и полезного радиосигнала.



Рисунок 4

Для проверки достоверности полученных решений проведены методом имитационного моделирования исследования по оценке помехоустойчивости разработанной схемы приемного устройства. Показано, что для случая T-OQPSK-, FQPSK- и GMSK-сигналов полученные кривые вероятности битовой ошибки с точностью порядка 0,1 дБ соответствуют приведенным в известной литературе.

В целях анализа эффективности использования разработанной процедуры двухкритериального синтеза радиосигналов с управляемой связью между квадратурными

составляющими на рисунке 5 построены зависимости спектральной эффективности от помехоустойчивости при вероятности битовой ошибки  $P_e = 10^{-3}$ , где кривая 1 соответствует семейству FQPSK-сигналов, кривая 2 – GMSK-сигналов, кривая 3 – множеству синтезированных сигналов.

Показано, что безусловно наилучшим соотношением помехоустойчивость – спектральная эффективность обладают сигналы, оптимальные по критерию минимума эффективной полосы частот. Однако

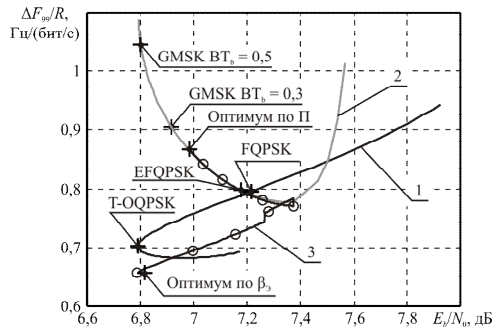


Рисунок 5

данные сигналы характеризуются высоким уровнем пик-фактора  $\Pi > 1,20$ , что делает

функционирование УФРУМС с соответствующими значениями управляющих параметров мало пригодным при нелинейном режиме работы усилителей мощности.

Объединение множества синтезированных сигналов с подмножеством GMSK-сигналов при  $BT_b > 0,25$  обеспечивает возможность генерировать радиосигналы с помехоустойчивостью в диапазоне  $E_b/N_0 \in [6,8; 7,2]$  дБ ( $P_e = 10^{-3}$ ), исходя из компромисса между уровнем флуктуаций огибающей и полосой частот радиосигнала. Это позволяет адаптировать УФРУМС под конкретные условия функционирования с учетом доступного частотного ресурса и режимом работы окончательных каскадов радиопередающего тракта.

**Во второй главе** разработана процедура двухкритериального, адаптивного к действующим помехам синтеза шумоподобных сигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими для повышения устойчивости современных СПИ в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

При формировании шумоподобных сигналов с современными видами модуляции наибольшее распространение получила схема четырехфазной передачи двоичной информации, использующая две КП – для синфазной и квадратурной составляющей. Показано, что данная операция эквивалентна расширению всей информационной последовательности единой КП. Обобщив этот подход на случай применения в СПИ УФРУМС, получили схему для формирования шумоподобных сигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими.

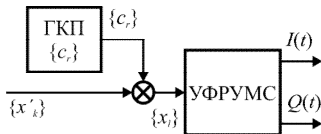


Рисунок 6

По аналогии с OQPSK-сигналами для приема шумоподобных сигналов на основе управляемой связи между квадратурными составляющими рассмотрена корреляционная схема, представленная на рисунке 7. Здесь СВН – схема восстановления несущей, ФНЧ – фильтр нижних частот, СВТЧ – схема восстановления тактовой частоты, УВБ – устройство взятия выборки, ЭЗ – элемент задержки, ИС – интегратор со сбросом, УПР – устройство принятия решения.

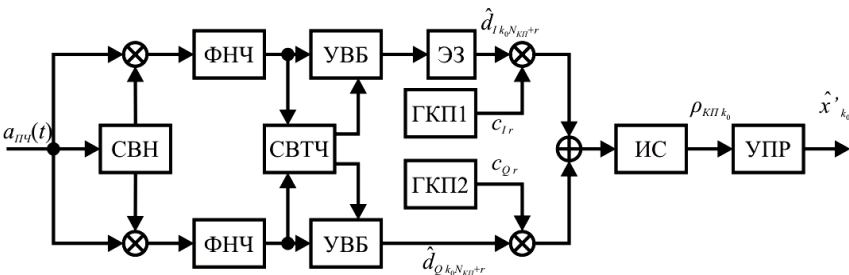


Рисунок 7

Проведенный анализ представленной схемы показал, что для канала с АБГШ применение шумоподобных сигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими в режиме GMSK-сигналов по помехоустойчивости на 6 дБ проигрывает случаю генерации FQPSK-сигналов.

Главным показателем качества функционирования данной схемы является отношение сигнал-помеха на входе УПР, поэтому задача адаптации к текущей ПО ставится как задача синтеза КП, обеспечивающей минимум мощности помехового сигнала на выходе ИС при условии отсутствия полезного радиосигнала на входе схемы. При этом в качестве помех рассматривалась смесь случайного узкополосного процесса, действующего в рабочем диапазоне частот СПИ, и АБГШ.

С целью реализации синтеза КП в реальном масштабе времени разработана эффективная процедура вычисления СПМ радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, основанная на вычислении фактора повторения спектра подобных сигналов согласно выражениям:

$$H_{КП}((n - N_{КП} / 2)\Delta f) = H_{КП1n} - \exp(-j\pi n / N_{КП})H_{КПQn}, \quad n = \overline{1; \frac{1}{2}N_{КП}},$$

$$H_{КП}((n + N_{КП} / 2)\Delta f) = H_{КП1n} + \exp(-j\pi n / N_{КП})H_{КПQn}, \quad n = \overline{(1 - \frac{1}{2}N_{КП}); 0}.$$

Здесь  $\{H_{КП1n}\} = \text{fft}(\{c'_{1r}\})$ ,  $\{H_{КПQn}\} = \text{fft}(\{c'_{Qr}\})$  – дискретные спектры вспомогательных последовательностей, пересчитываемых из единой КП по формулам для FQPSK –  $c'_{1r} = (-1)^r c_{2r}$ ,  $c'_{Qr} = (-1)^r c_{(2r+1)}$ ,  $r = \overline{0, (N_{КП} - 1)}$ , для GMSK –  $c_{1r} = (-1)^r \prod_{l=0}^{2r-1} (-1)^l c_l$ ,  $r = \overline{1, (N_{КП} - 1)}$ ,  $c_{Qr} = (-1)^r \prod_{l=0}^{2r} (-1)^l c_l$ ,  $r = \overline{0, (N_{КП} - 1)}$ , где  $c_{l0} = 1$ .

Проведенное имитационное моделирование показало адекватность разработанной процедуры периодограммному методу спектральной оценки. Таким образом, эффективная процедура вычисления СПМ радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими позволяет отказаться от проведения математического моделирования и тем самым до двух раз сократить вычислительные затраты при проведении адаптивного к текущей ПО синтеза КП.

В интересах повышения устойчивости и эффективности процедуры синтеза КП в качестве критерия приближения обосновано использование функционала вида:

$$\Delta_{G2} = (1 - \lambda_3) \sum_{n=0}^{N_{КП}-1} \chi(G_e(f_n), \lambda_4) |G(f_n) - G_e(f_n)|^2 + \lambda_3 \sum_{n=1}^{N_{КП}-1} |\Delta G(f_n) / \Delta f|^2,$$

где  $G(f_n)$  – СПМ полезного сигнала,  $G_e(f_n)$  – «эталонный» спектр,  $\Delta G(f_n)$  – конечная разность СПМ полезного сигнала,  $N_{КП}$  – количество элементов канальных КП,  $\lambda_3 \in [0; 1]$  – коэффициент,  $\chi(u_1, \lambda_4) = \exp(-\lambda_4^2 (u_1 - \inf u_1)^2 / (\sup u_1 - \inf u_1)^2)$  – нелинейное преобразование. Здесь первое слагаемое характеризует степень приближения к «эталону», второе влияет на уровень боковых выбросов АКФ, а нелинейное преобразование позволяет управлять значимостью в процедуре синтеза КП спектральных областей, наименее подверженных воздействию помех.

С целью определения «эталонного» спектра, максимизирующего отношение сигнал-помеха на выходе ИС, рассмотрена задача

$\max_{G_e(f)} \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} G_e^2(f) df / \int_{-\infty}^{+\infty} G_e(f) G_n(f) df}$ , где  $G_n(f)$  – СПМ действующей ПО. Показано,

что данная формулировка эквивалентна вариационной задаче  $\min_{G_e(f)} \int_{-0,5/T_s}^{0,5/T_s} G_e(f) G_n(f) df$  при ограничениях  $\int_{-0,5/T_s}^{0,5/T_s} G_e^2(f) df = 1$  и  $\int_{-0,5/T_s}^{0,5/T_s} G_e(f) df = 1$ , решением которой является

$$G_e(f) = \lambda_5 - \lambda_6 G_n(f), \quad (7)$$

где  $\lambda_5, \lambda_6$  - множители Лагранжа. При  $\lambda_5 = \sup_f G_n(f)$  и  $\lambda_6 = 1$  выражение (7) соответствует решению задачи максимизации пропускной способности радиоканала, полученного К. Шенноном.

При оптимизации КП в настоящее время широко используется метод покоординатного спуска. Однако данный подход требует большого числа вычислительных операций, а также характеризуется высокой чувствительностью к начальным условиям. В связи с этим метод покоординатного спуска мало эффективен при оптимизации КП длиной более 100 элементов. Поэтому сотрудниками кафедры радиоуправления и связи РГРТУ разработана блочная процедура оптимизации, когда на каждой итерации происходит изменение не одного элемента, а целого блока, при этом размер блоков постепенно уменьшается по ходу приближения к точке оптимума. Также для увеличения вероятности достижения глобального максимума можно применять двухэтапную процедуру оптимизации КП. При этом на первом этапе используется блочная процедура, а на втором – метод покоординатного спуска.

Проведенный на основе метода имитационного моделирования анализ эффективности этих методов для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими показал, что наилучшим сочетанием быстрдействие – точность приближения обладает блочная процедура оптимизации.

Для адаптации СПИ к действующим мешающим факторам требуется оперативно отслеживать ПО. Так как на практике имеется два механизма ухода от помех – перестройкой синтезатора частот и синтезом КП, разработана процедура спектральной оценки ПО на основе аппарата быстрого преобразования Фурье, параллельно отслеживающая зашумленность доступных диапазонов частот и структуру спектра мешающего сигнала внутри рабочего диапазона. Методом имитационного моделирования показано, что предложенный подход обеспечивает ослабление СКО выборочного спектра в 4...7 раз при продолжительности переходного процесса порядка 15...111 битовых интервалов.

Для анализа взаимодействия разработанных процедур спектрального оценивания и синтеза КП проведено имитационное моделирование воздействия на приемник радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими узкополосной помехи с шириной спектра 5 %. При этом эффективность функционирования предложенных процедур оценивалась на основе коэффициента дополнительного ослабления помехи  $\gamma_1$  и среднеквадратического значения уровня боковых выбросов (УБВ) АКФ  $\gamma_2$ :

$$\gamma_1 = 10 \log_{10}(P_{КП1} / P_{КП0}), \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{N_{КП}} \sum_{n=1}^{N_{КП}} R^2(nT_S)},$$

где  $P_{КП0}, P_{КП1}$  – мощности помехи на входе УПР до и после процедуры адаптивного к ПО синтеза КП,  $R(\tau)$  – АКФ радиосигнала с управляемой связью между квадратурными составляющими. Показано, что множества «нехудших» по данным критериям качества КП достигается при следующих значениях коэффициентов:

для FQPSK-сигналов:  $\lambda_4 \in [0; 2,5]$ ,  $\lambda_3(\lambda_4) = 0,044\lambda_4^3 - 0,143\lambda_4^2 - 0,265\lambda_4 + 0,896$ ;

для GMSK-сигналов:  $\lambda_4 \in [0; 3]$ ,  $\lambda_3 = 0$ .

На основе анализа этих множеств показано, что сформированные GMSK-сигналы проигрывают FQPSK-сигналам порядка 5 дБ в подавлении помех и более 7 %

в УБВ АКФ. Таким образом, доказана нецелесообразность использования GMSK-сигналов при формировании шумоподобных сигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими. При этом в случае FQPSK-сигнала обеспечивается подавление узкополосной помехи порядка 11 дБ при  $\lambda_4 = 2,5$ . Проведенные аналогичные исследования FQPSK-сигналов для помех с относительной полосой 10 % и 20 % показали, что применение разработанной процедуры синтеза КП обеспечивает ослабление данных мешающих факторов на 10 дБ и 9 дБ соответственно.

С целью учета при синтезе КП компромисса между степенью подавления помех и УБВ АКФ на основе полученных зависимостей  $\gamma_1(\lambda_4)$  и  $\gamma_2(\lambda_4)$  для рассмотренных видов ПО предложены характеристики вида  $\gamma_{01c}(\lambda_4) = 1 - 0,4\lambda_4$  и  $\gamma_{02c}(\lambda_4) = 0,4\lambda_4$  при  $\lambda_4 \in [0; 2,5]$ . Эти зависимости с ошибкой менее 10 % определяют относительный уровень достигаемых величин дополнительного коэффициента усиления помехи и УБВ АКФ при заданном значении параметра  $\lambda_4$ .

Также методом имитационного моделирования показано, что в случае действия гармонической помехи разработанная процедура адаптивного синтеза КП позволяет дополнительно по сравнению с шумодобными сигналами на основе ПСП обеспечить уровень подавления мешающего сигнала на 25 дБ и более.

**В третьей главе** проведено макетирование на современной элементной базе разработанного УФРУМС, в ходе экспериментов исследованы спектральные и энергетические характеристики генерируемых сигналов, а также рассмотрены аспекты практической реализации разработанных процедур спектральной оценки ПО и адаптивного к текущей помехе синтеза КП для СПИ, использующих шумоподобные GMSK- и FQPSK-сигналы.

С целью практической реализации УФРУМС был разработан макет на основе оценочных плат ЦСП BF537 и МЦСС AD9957, взаимодействие между которыми реализовано с использованием последовательного и параллельного интерфейсов, а также шины управления.

Проведенные экспериментальные исследования СПМ генерируемых радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими показали, что при скорости передачи менее 790 кбит/с удовлетворяются требования к уровню внеполосного излучения в соответствии с рекомендациями Комитета CCSDS (спектральная маска SFCHG для низкоскоростных приложений) и нормами Государственной комиссии по радиочастотам, установленными для систем с кодовым разделением каналов гражданского назначения. При этом максимальная достижимая на макете УФРУМС скорость передачи составила 1 Мбит/с. Также показано, что изменения формы СПМ, возникающие при уменьшении до 12 числа точек на символьном интервале, незначительно влияют на занимаемую полосу частот, так как не искажают форму главного лепестка спектра, а воздействуют лишь на внеполосное излучение радиосигнала с относительным уровнем менее -35 дБ.

В интересах анализа энергетических характеристик проведены измерения сигнальных созвездий радиосигналов, генерируемых на разработанном макете при разных значениях управляющих параметров. Показано, что чувствительность пик-фактора к уменьшению частоты дискретизации тем больше, чем меньше теоретический уровень флуктуаций огибающей радиосигнала. Таким образом, уменьшение количества отсчетов на символьном интервале до 12 всего на 0,1 дБ (на 0,02 в абсолютном значении) увеличивает пик-фактор сигналов с T-OQPSK и оптимизированных

по критерию минимума эффективной полосы частот по сравнению со случаем 64 отсчетов. Для таких видов модуляции, как FQPSK и GMSK, при тех же условиях наблюдается изменение уровня флуктуаций огибающей более чем на 0,7 дБ или на 0,1 в абсолютном значении.

С целью выбора элементной базы для реализации разработанных процедур спектральной оценки ПО и адаптивного к текущим помехам синтеза КП проведен анализ влияния разрядности представления операндов на степень подавления мешающего воздействия. Методом имитационного моделирования показано, что при 16-значном представлении операндов коэффициент подавления помехи равен значению, потенциально достижимому на разработанной алгоритмической базе. Для длин КП не более 512 элементов в целях экономии вычислительных ресурсов можно ограничиться разрядностью 12 бит. При этом проигрыш в коэффициенте усиления помехи составит менее 15 %, а выигрыш в аппаратных ресурсах, необходимых для реализации умножения, составит более 50 % и 25 % – для операций сложения.

В интересах определения требуемого быстродействия ЦСП при реализации процедур оценки ПО и синтеза КП получены зависимости количества элементарных операций в секунду от длины расширяющей КП. Показано, что при длине единой КП не более 1024 элементов использование ЦСП BF537 обеспечивает скорость передачи информационного потока 32 кбит/с и оперативность адаптации КП к изменениям в ПО менее 50 мс. При увеличении длины КП и/или скорости передачи обоснована целесообразность совместного применения ЦСП и ПЛИС для распараллеливания вычислений в алгоритме БПФ. На основе проведенного анализа сформулированы требования к данным микросхемам. Показано, что при длине единой КП 2048 элементов и скорости передачи информационного потока 32 кбит/с возможно использование ЦСП BF537 и ПЛИС XC3S5000 для реализации разработанных процедур спектральной оценки ПО и адаптивного синтеза КП.

С целью оценки эффективности совместного использования процедуры оптимизации КП и предложенного УФРУМС проанализированы СПМ шумоподобных сигналов, формируемых на базе разработанного макета. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что разработанная процедура оптимизации КП в режиме FQPSK-сигналов обеспечивает формирование провала в 13,5 дБ при относительной ширине полосы частот 12,5 % и 11 дБ – при ширине 25 %. Данные результаты хорошо согласуются с оцененными в главе 2 характеристиками подавления помех с ограниченным спектром.

Таким образом, на основе разработанного макета УФРУМС достижима скорость передачи информационного потока в режиме прямого расширения спектра порядка 3,5 кбит/с при 12 отсчетах на символьный период.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1 Предложено общее представление GMSK- (при  $BT_b \in [0,26; 0,6]$ ) и FQPSK-сигналов на основе радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающее ошибку приближения по углу не более  $5^\circ$ , а по амплитуде не более 0,5 дБ, при этом достигается уменьшение уровня первых боковых лепестков СПМ на 3 дБ и более в случае GMSK-сигналов и увеличение скорости спада внеполосного излучения на 20 дБ/дек в случае FQPSK-сигналов.

2 Получены в аналитическом виде выражения для частотного спектра, спектральных и энергетических характеристик, а также помехоустойчивости радиосигна-

лов с управляемой связью между квадратурными составляющими.

3 Показано, что радиосигналы с управляемой связью между квадратурными составляющими позволяют на 50 % варьировать ширину главного лепестка спектра перестройкой двух параметров, обеспечивая скорость спада внеполосного излучения на уровне 60 дБ/дек.

4 Разработана процедура синтеза по комбинированному критерию качества радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, позволяющая варьировать полосу частот радиосигнала в пределах 28 %, а уровень флуктуаций огибающей – до 1,9 дБ.

5 Показано, что оптимальный по критерию минимума вероятности битовой ошибки прием сигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими обеспечивается алгоритмом Витерби, на основе которого разработана структурная схема устройства детектирования сигналов, генерируемых УФРУМС.

6 Доказано, что в случае объединения множества синтезированных сигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими с подмножеством реализуемых на УФРУМС GMSK-сигналов возможно управлять помехоустойчивостью в диапазоне  $E_b / N_0 \in [6,4; 7,2]$  дБ ( $P_e = 10^{-3}$ ), исходя из компромисса между уровнем флуктуаций огибающей и полосой частот радиосигнала.

7 Разработана эффективная процедура расчета СПМ радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими при реализации четырехфазной передачи двоичного информационного потока в режиме GMSK- и FQPSK-сигналов, обеспечивающая сокращение вычислительных затрат в 2 раза по сравнению с математическим моделированием.

8 Обосновано применение в процедуре адаптивного синтеза КП критерия приближения, позволяющего управлять степенью подавления действующих помех при некоторых изменениях корреляционных свойств полезного радиосигнала, а также включающего нелинейность, которая повышает эффективность перераспределения энергии полезного радиосигнала между «чистыми» и зашумленными участками спектра. Данный подход обеспечивает увеличение выигрыша в подавлении помех порядка 8 дБ и 6 дБ для режимов FQPSK и GMSK соответственно.

9 Доказано методами вариационного исчисления, что выбор «эталонного» спектра на основании критерия максимума отношения сигнал-помеха на выходе оптимального приемника соответствует в частном случае решению, полученному К. Шенноном, для задачи максимизации пропускной способности радиоканала СПИ.

10 Показано, что наилучшей в плане компромисса между быстродействием и точностью приближения к области глобального оптимума является блочная процедура, характеризуемая наибольшей среди рассмотренных устойчивостью решений к выбору начальных условий, форме «эталонного» спектра и смене вида модуляции полезного радиосигнала.

11 Разработана процедура двухкритериального, адаптивного к текущей ПО синтеза КП для радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими, обеспечивающая дополнительное по сравнению с ПСП той же длины подавление ПОС на 9 дБ, узкополосных – на 11 дБ и гармонических – на 25 дБ и более.

12 Доказано, что FQPSK-сигналы позволяют обеспечить большее (выигрыш порядка 5 дБ) по сравнению со случаем GMSK-сигналов подавление помех при меньшем (выигрыш более 7 %) среднеквадратическом значении УБВ АКФ.



13 Разработан макет УФРУМС на основе оценочных плат ЦСП BF537 и МЦСС AD9957, позволяющий обеспечить скорость передачи информационного потока до 1 Мбит/с при уровне флуктуаций огибающей порядка 1,2 дБ и до 400 кбит/с при значении пик-фактора не более 0,5 дБ.

14 Доказано, что при практической реализации радиосигналы с управляемой связью между квадратурными составляющими удовлетворяют требованиям к уровню внеполосного излучения в соответствии с рекомендациями Комитета CCSDS (спектральная маска SFCG для низкоскоростных приложений) и нормами Государственной комиссии по радиочастотам, установленными для систем с кодовым разделением каналов гражданского назначения.

15 Показано, что при реализации адаптивного к действующей ПО синтеза КП достаточным является 16-значное представление операндов. Доказано, что уменьшение разрядной сетки до 12 бит позволяет производить адаптацию КП длиной не более 512 элементов при выигрыше в аппаратных ресурсах на реализацию умножения более чем на 50 % и на 25 % для операций сложения. При этом проигрыш в коэффициенте подавления помехи составляет менее 15 %.

16 Обосновано при практической реализации процедур оценки ПО и оптимизации КП совместное использование ЦСП и ПЛИС. Показано, что данный подход за счет распараллеливания вычислений позволяет сократить время вычисления 1024-точечного БПФ более чем в 150 раз. Сформулированы требования к вычислительным ресурсам элементной базы, которым удовлетворяют ЦСП BF537 и ПЛИС XC3S5000.

17 Доказано, что на основе разработанного макета УФРУМС достигима скорость передачи информационного потока в режиме прямого расширения спектра порядка 3,5 кбит/с при выборе частоты дискретизации, соответствующей  $M_C = 12$ .

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Кириллов С.Н., Покровский П.С. Программируемый модулятор для унифицированных систем передачи информации // 15-я международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи информации в сетях и системах телекоммуникаций»: тез. докл. Рязань, 2008. С. 61-62.

2 Кириллов С.Н., Покровский П.С. Унифицированный программно-управляемый квадратурный формирователь радиосигналов // 34-я всероссийская научно-техническая конференция «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды». Рязань, 2009. С. 346-347.

3 Покровский П.С. Программно-управляемый квадратурный формирователь радиосигналов для служб изучения космического пространства // 14-я всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании (НИТ-2009)». Рязань, 2009. С. 324-325.

4 Покровский П.С., Семин Д.С. Телемедицинские системы дистанционного мониторинга и диагностики самочувствия // Международная конференция с элементами научной школы для молодёжи «Биотехнические, медицинские, экологические системы и комплексы». Рязань, 2009. С. 474-479.

5 Кириллов С.Н., Покровский П.С., Семин Д.С. Универсальный помехозащищенный тракт передачи информации // Труды 12-й международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010». Т. 2, Моск-

ва, 2010. С. 281-283.

6 Кириллов С.Н., Покровский П.С. Адаптивный к помеховой обстановке алгоритм синтеза кодовой последовательности OQPSK- и MSK-сигналов // 16-я международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи информации в сетях и системах телекоммуникаций»: тез. докладов. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010. С. 92-93.

7 Покровский П.С. Нефизическая модель для устойчивого предсказания траектории движения КО // 15-я всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании (НИТ-2010)». Рязань, 2010. С. 135-136.

8 Покровский П.С. Процедура адаптивного к помеховой обстановке синтеза кодовой последовательности OQPSK- и MSK-сигналов для промышленных систем управления // Вестник РГРТУ, № 4, выпуск 34, 2010. С.43-50.

9 Кириллов С.Н., Слесарев А.С., Покровский П.С., Семин Д.С. Реализация программно-управляемого формирователя радиосигналов телекоммуникационных систем на основе прямого цифрового синтеза // Труды 13-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2011». Москва, 2011. С 267-270.

10 Покровский П.С. Устойчивая процедура синтеза сигнального созвездия для создания универсальной системы передачи информации / Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2011. С. 122-126.

11 Кириллов С.Н., Покровский П.С. Программно-управляемый квадратурный формирователь спектрально эффективных видов радиосигналов на основе «зависимых» последовательностей импульсов // Вестник РГРТУ, №2, выпуск 36, 2011. С. 24-27.

12 Кириллов С.Н., Покровский П.С. Процедура многокритериального синтеза сигнального созвездия для спектрально эффективных видов модуляции радиосигнала // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2011): материалы 9-й международной научно-технической конференции/ Владим. гос. ун-т. – Владимир: ВлГУ, т.3. – 2011. С.36-40.

13 Кириллов С.Н., Слесарев А.С., Покровский П.С., Семин Д.С., Афанасьев Д.В. Программно управляемый формирователь радиосигналов космических систем передачи информации // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: тез. докладов 4-й Всероссийской научно-технической конференции / ОАО «Российские космические системы». – М.: Радиотехника, 2011. С.183-184.

14 Семин Д.С., Покровский П.С. Алгоритм адаптации помехоустойчивого кодера на основе апостериорной информации о частоте битовых ошибок // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании (НИТ-2011): материалы 16-й всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов / РГРТУ. – Рязань: РГРТУ, 2011. С. 97-99.

15 Покровский П.С., Семин Д.С. Вероятностные модели воздействия различных типов помех на бинарный кодированный поток при современных видах модуляции радиосигнала // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании (НИТ-2011): материалы 16-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов / РГРТУ. – Рязань: РГРТУ, 2011. С. 99-101.

Покровский Павел Сергеевич

Процедуры формирования адаптивных к мешающим факторам радиосигналов с управляемой связью между квадратурными составляющими для систем передачи информации

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Отпечатано ГНУ ВНИМС Россельхозакадемии,  
390025, Рязань, ул. Щорса, д. 38/11  
Формат бумаги 60x84 1/16  
Условных печатных листов 1  
Тираж 100 экз. Заказ № 56.

10 апреля 2012 г.