

*На правах рукописи*



Стоянов Дмитрий Драганович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ  
СИГНАЛОВ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ**

Специальность: 05.12.04

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Владимир – 2014

Работа выполнена на кафедре динамики электронных систем  
ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»

Научный руководитель: **Приоров Андрей Леонидович**  
доктор технических наук, доцент,  
доцент кафедры динамики электронных систем  
ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный  
университет им. П.Г. Демидова»,  
г. Ярославль

Официальные оппоненты: **Егоров Сергей Иванович**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВПО  
«Юго-Западный государственный университет»,  
г. Курск.

**Мочалов Иван Сергеевич**  
кандидат технических наук, инженер  
ООО «Эдвансед Трансформейшн Консалтинг»,  
г. Ярославль

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Вятский государственный  
университет», г. Киров

Защита диссертации состоится «27» января 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Автореферат разослан «17» ноября 2014 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и состояние вопроса.** В настоящее время наблюдается стремительное развитие радиосистем передачи данных. Постоянно растущие требования к скорости и объему передаваемой информации вынуждают разработчиков таких систем использовать широкополосные каналы связи. Одновременно с этим растет потребность более эффективно использовать радиочастотный спектр для обеспечения возможности доступа к информационным ресурсам новых пользователей.

Вопросами увеличения эффективности использования радиочастотного спектра занимался Д. Митола (J. Mitola), и на основе его работ появилась концепция когнитивного радио.

Когнитивное радио (КР) – это беспроводная интеллектуальная система связи, способная анализировать окружающую обстановку и приспосабливаться к ней посредством обучения, реагируя на изменения в окружении изменением своих собственных параметров (например, несущей частоты, мощности, способа модуляции) в реальном времени с целью увеличения эффективности использования спектрального ресурса.

Отличительной особенностью систем КР является их способность обнаруживать и динамически использовать свободные диапазоны радиочастот для доступа абонентов к сети КР. Такая возможность осуществляется посредством автономного мониторинга спектра во всем рабочем диапазоне радиочастот, который может составлять от единиц МГц до нескольких ГГц и зависит от стандарта, использующего когнитивные функции.

Основной задачей мониторинга спектра (МС) в КР является обнаружение сигналов, действующих во всем рабочем диапазоне частот, и разбиение этого диапазона на «занятые» и «свободные» полосы. Поскольку процесс МС в КР исключает присутствие оператора, корректирующего параметры системы, требуется применение таких алгоритмов обнаружения (АО), качественные характеристики которых были бы устойчивы по отношению к неизвестным параметрам и свойствам регистрируемых сигналов в широком диапазоне рабочих частот.

Задача обнаружения сигналов в КР осложняется ограниченностью априорных данных о подлежащих обнаружению радиосигналах, а, чаще всего, они полностью отсутствуют.

Один из путей преодоления априорной неопределенности состоит в применении адаптивных АО. В данном направлении работали такие ученые как А.М. Рембовский, А.Б. Токарев. Существующие адаптивные параметрические АО радиосигналов синтезированы на основе моделей стандартных законов распределения, таких как распределение Гаусса, Релея, Райса и ряда других подобных распределений, и в случае изменения вида функции распределения сигнала эффективность обнаружения таких алгоритмов (оптимальных, как правило, только для одной модели распределения) резко снижается.

Другим путем преодоления априорной неопределенности может быть применение алгоритмов, использующих принцип инвариантности. В последнее

время задачей синтеза инвариантных АО занимались такие специалисты как В.А. Богданович, Ё.Ю. Бородич, М.Е. Шевченко, А.О. Чемаров. Разработанные этими учеными алгоритмы обеспечивают эффективное обнаружение только узкополосных сигналов, характерных, в основном, для КВ диапазона. Однако технологии КР не ограничивают область своего применения КВ диапазоном, поэтому применение данных АО для МС в КР может быть весьма ограниченным.

Кроме того, в условиях априорной неопределенности существенной проблемой является обнаружение широкополосных сигналов. Вопросами разработки АО широкополосных сигналов занимались Я.Д. Ширман, В.Г. Радзиевский, А.П. Дятлов, среди зарубежных авторов – S. Naikin, D.J. Tomson, G. Xu, M. Wax. Такие АО могут быть основаны на применении корреляционного анализа, вейвлет-анализа или проверке наблюдаемого сигнала на циклостационарность. Указанные методы обладают высокой помехоустойчивостью относительно классического энергетического приемника, но при этом требуют больших вычислительных затрат. Кроме того, для большинства данных алгоритмов необходимо априорное знание ширины полосы обнаруживаемого сигнала, что на практике чаще всего нереализуемо.

Современные стандарты беспроводной передачи данных комбинируют в себе узкополосные и широкополосные сигналы, использующие различные виды модуляций, что не позволяет создать единую модель для статистического описания всех типов используемых сигналов, поэтому особое внимание при разработке АО для систем КР следует обратить на непараметрические методы обнаружения.

Таким образом, в настоящее время является актуальной задача создания алгоритмов обнаружения радиосигналов, ориентированных на применение в условиях априорной неопределенности относительно действующих в рабочей полосе радиосигналов для решения задачи МС в КР в широком диапазоне частот.

**Целью работы** является разработка и анализ алгоритмов обнаружения радиосигналов в частотной области в условиях априорной неопределенности для решения задачи мониторинга спектра в когнитивных радиосетях.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

- сравнительный анализ существующих алгоритмов обнаружения сигналов и оценка степени их применимости для решения задачи мониторинга спектра в когнитивных радиосистемах;
- разработка непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов в условиях априорной неопределенности относительно обнаруживаемых сигналов;
- разработка методики получения эмпирической характеристики обнаружения;
- исследование характеристик разработанных алгоритмов при помощи статистического моделирования и апробация на реальных радиосигналах в

условиях полунатурного моделирования.

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, теории обнаружения, статистической радиотехники, спектрального анализа. При исследовании алгоритмов применялись методы математического и полунатурного моделирования.

**Объектом исследования** являются методы обнаружения радиосигналов, предназначенные для автономного радиомониторинга в интеллектуальных самообучающихся радиосистемах.

**Предметом исследований** являются параметрические и непараметрические алгоритмы, позволяющие решать задачу обнаружения радиосигналов в условиях априорной неопределенности.

### **Научная новизна**

Впервые получены следующие научные результаты:

1. Предложена модификация знако-рангового критерия Вилкоксона, позволяющая решать задачу статистического обнаружения сигнала на фоне шума с асимметричным распределением.
2. Разработан алгоритм обнаружения широкополосных сигналов, основанный на модифицированном критерии Вилкоксона, работающий в условиях непараметрической априорной неопределенности.
3. Разработан комбинированный алгоритм обнаружения для решения задачи мониторинга спектра в когнитивных радиосистемах в широком частотном диапазоне.

### **Практическая значимость**

1. Предложенная модификация непараметрического критерия Вилкоксона расширяет сферу его применения на задачи обнаружения сигнала в частотной области на фоне шума с асимметричным видом плотности вероятности в условиях непараметрической априорной неопределенности.
2. Эффективность разработанного АО по сравнению с известным и применяемым на практике алгоритмом выше на 1..14 дБ при отношении сигнал/шум (ОСШ) в полосе обзора от -16 дБ до 16 дБ для сигналов современных стандартов радиосвязи, имеющих различные статистические характеристики.
3. Разработанный комбинированный алгоритм обнаружения объединяет в себе преимущества существующего АО узкополосных сигналов и разработанного непараметрического алгоритма, эффективного при обнаружении широкополосных сигналов. Это позволяет применять его для обнаружения сигналов в диапазоне частот от единиц МГц до нескольких ГГц в условиях отсутствия априорной информации относительно действующих в данной полосе сигналов.
4. Разработана программа «SignalDetecting» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014618161), которая позволяет проводить анализ АО радиосигналов по набору синтезированных сигналов с различными

статистическими характеристиками, путем статистического моделирования рассчитывать и отображать характеристики обнаружения, проверять работу АО на записях реальных радиосигналов.

Результаты работы внедрены в разработки ОАО «Ярославский радиозавод» и ООО «Оскар» (г. Ярославль). Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова (ЯрГУ) в рамках дисциплины «Сети и системы радиосвязи». Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Достоверность материалов диссертационной работы** подтверждена согласованностью результатов математического моделирования разработанных алгоритмов и экспериментальной проверки в условиях полунатурного моделирования на реальных сигналах, апробацией в печати и на научно-практических конференциях различного уровня.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 69 Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», Москва, 2014.
- XIX Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития информационных технологий», Новосибирск, 2014.
- Международная научно-практическая конференция «Технические науки: теоретические и прикладные аспекты», Уфа, 2014.
- XIII, XIV Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2011–2012.
- XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2012.
- I Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны», Пенза, 2011.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, 9 докладов на научных конференциях; получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Выносимые на защиту положения предложены и реализованы автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре динамики электронных систем ЯрГУ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 124 страницах, включая список литературы из 115 наименований, 56 рисунков и 1 таблицу.

## Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Модификация знако-рангового критерия Вилкоксона, позволяющая решать задачу статистического обнаружения сигналов в частотной области.
2. Алгоритм обнаружения широкополосных сигналов современных телекоммуникационных стандартов связи.
3. Комбинированный алгоритм обнаружения сигналов для решения задачи мониторинга спектра в когнитивных радиосетях в широком частотном диапазоне.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** освещаются актуальные задачи КР и состояние вопроса по внедрению данной технологии в России. Выносятся проблема о необходимости создания АО, ориентированных на особенности задачи мониторинга спектра в КР. Приводится описание используемой модели наблюдаемых данных и статистические характеристики модели шума.

Показана необходимость проведения обнаружения сигналов в частотной области, поэтому в качестве элементов исходных данных используются отсчеты энергетического спектра анализируемого процесса  $S_{\text{ex}(r)}(k)$ :

$$X_R(m) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \left| \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{ex}(r)}(k) e^{-j2\pi mk/N} \right|^2, \quad (1)$$

рассчитываемые путем усреднения  $R$  спектральных выборок дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Здесь  $r = \overline{1, R}$  – порядковый номер выборки,  $k$  и  $m$  – номера отсчетов во временной и частотной областях,  $N$  – число точек ДПФ.

Показано, что в случае отсутствия сигнальных компонент и наличия только гауссовского шума, спектральные отсчеты  $X_R(m)$  представляют собой независимые случайные величины, подчиняющиеся центральному  $\chi^2$  (хи-квадрат) распределению:

$$W_{\chi^2}(x; a, \lambda, J) = \frac{1}{\lambda \Gamma(J/2)} \left( \frac{x-a}{\lambda} \right)^{J/2-1} e^{-(x-a)/\lambda}, \quad (2)$$

с  $J=2R$  степенями свободы и параметрами  $a=0$ ,  $\lambda = \sigma_{\xi}^2 / RN$ , где  $\sigma_{\xi}^2$  – мощность шума,  $\Gamma(J)$  – гамма функция.

Проведен сравнительный анализ существующих параметрических и непараметрических АО сигналов и оценка степени их применимости для решения задачи МС в КР.

Более подробно рассмотрен существующий параметрический квазиоптимальный алгоритм, основанный на пороговой процедуре разделения всей совокупности наблюдаемых отсчетов энергетического спектра на

«сигнальные» и «шумовые». Выражение для определения порога:

$$x_{nop}(\sigma_\xi^2) = \frac{\sigma_\xi^2}{N} \left( 1 - \frac{1}{9R} - x_\varepsilon \sqrt{\frac{1}{9R}} \right)^3, \quad (3)$$

где  $x_\varepsilon$  – процентная точка гауссовского распределения.

Данный алгоритм синтезирован при условии, что сигнал и шум имеют нормальное распределение. Однако если для шумов точность аппроксимации нормальным законом реального распределения оказывается достаточно высокой при вероятности ложного обнаружения  $10^{-2} \dots 10^{-3}$ , то для сигналов данное предположение хорошо выполняется только в случае относительно узкополосных сигналов с аналоговыми типами модуляции. Отклонение вида распределения сигнала от нормального может негативно сказаться на вероятности обнаружения. Но, несмотря на данные обстоятельства, описанный алгоритм нашел широкое применение в комплексах мониторинга радиообстановки в широких диапазонах частот.

В работе особое внимание уделяется непараметрическим АО и, в частности, основанным на критерии Вилкоксона. Данный тип обнаружителя наиболее мощный по сравнению с алгоритмами, основанными на знаковых статистиках. Он незначительно уступает в эффективности обнаружения другим непараметрическим АО, основанным на критериях Ван-дер-Вадена, Левина-Кушнера, Гаека, обладая при этом значительно меньшей вычислительной сложностью.

В данном случае задача обнаружения может быть сформулирована в виде задачи проверки статистических гипотез относительно наблюдаемой выборки:

$$\begin{aligned} H_0: M &= M_0 \text{ (сигнал отсутствует),} \\ H_1: M &> M_0 \text{ (сигнал присутствует),} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $M_0$  – медиана распределения шума,  $M$  – медиана распределения смеси сигнала с шумом.

Решение о принятии альтернативной гипотезы  $H_1$  и, следовательно, наличии сигнала в наблюдаемой выборке выносится на основе критерия Вилкоксона:

$$H_1: T^+ = \sum_{i=1}^n R_i^+ \varphi_i \geq C_{nop}, \quad (5)$$

где  $R_i^+$  – ранги абсолютных значений элементов выборки,  $\varphi_i$  – переменная, определяющая их знаки,  $C_{nop}$  – некоторый порог, который выбирается, исходя из заданной вероятности ложного обнаружения  $F_{ло}$ . Приближенное выражение, связывающее  $F_{ло}$  и  $C_{nop}$ :

$$F_{ло} \approx \Phi \left( \frac{n^2 / 4 - C_{nop}}{\sqrt{n^3 / 12}} \right), \quad (6)$$

где  $\Phi()$  – функция нормального распределения,  $n$  – длина выборки.

Учитывая преимущества критерия Вилкоксона, применение

рассмотренного непараметрического обнаружителя позволит эффективно решать задачу обнаружения сигналов в КР. Однако непосредственное применение данного критерия не представляется возможным в силу асимметрии закона распределения шумовых отсчетов энергетического спектра. Поэтому необходима модификация критерия Вилкоксона, расширяющая область его применения на задачи обнаружения сигналов в частотной области на фоне шума с асимметричным распределением.

Также в данной главе приводится описание методов оценки мощности шума в полосе обзора, поскольку данная оценка используется в большинстве существующих АО.

**Во второй главе** представлена модификация непараметрического статистического критерия Вилкоксона.

Проанализированы особенности элементов статистики Вилкоксона для симметричного и асимметричного вида распределений шума. Установлено, что вид распределения значений сумм знаковых рангов  $T^+$  для наблюдаемого процесса с асимметричным распределением не изменяется и так же, как и для симметрично распределенного шума, хорошо аппроксимируется нормальным законом распределения. Однако увеличение математического ожидания распределения сумм знаковых рангов  $T^+$  относительно теоретического значения приводит к превышению вероятности ложного обнаружения. Это объясняется определенной зависимостью рангов  $R_i^+$  элементов выборки  $x_i, i = \overline{1, n}$  и их знаковых функций  $\varphi_i, i = \overline{1, n}$ .

Поэтому предлагается компенсировать завышенную сумму знаковых рангов путем уменьшения числа положительных отсчетов в центрированной относительно медианы выборке. Данный подход может быть реализован с помощью введения поправочного коэффициента для значения медианы в выражении центрирования выборки:

$$x_i = x_i^* - K \cdot M_0, i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где  $x_i^*$  – отсчеты энергетического спектра (1).

В ходе работы осуществлялись статистические испытания знако-рангового критерия Вилкоксона по отсчетам энергетического спектра белого гауссовского шума (БГШ) для значений поправочного коэффициента  $K$  в диапазоне от 1 до 1,5.

Получен поправочный коэффициент  $K_{\min}$  медианы распределения шумовых спектральных отсчетов, который позволяет внести поправки для стабилизации  $F_{\text{ло}}$  критерия на заданном уровне.

Показано, что с увеличением числа усредняемых спектров  $R$ , значение  $K_{\min}$  приближается к 1, что свидетельствует о стремлении асимметричного вида распределения отсчетов шума к симметричному. В ходе анализа получено, что при значении параметра  $R = 10$  мера асимметрии распределения, определяемая в работе как отношение математического ожидания –  $m_1[x]$  к медиане –  $M_0$  полученного распределения, не превышает 5%.

Также проведено исследование зависимости  $K_{\min}$  от числа усредненных спектров  $R$  для разных значений параметра  $n$  (рис. 1).

Показано, что умножение  $K_{\min}$  на отрицательно смещенную оценку медианы шумовых отсчетов приведет к существенному росту вероятности ложного обнаружения. Для выхода из этой ситуации предлагается центрирование выборки проводить по математическому ожиданию шумовых отсчетов. Для этого получена зависимость отношения математического ожидания к медиане  $m_1[x]/M_0$  от числа усредненных спектров  $R$  (рис. 1). Показано, что значение  $m_1[x]/M_0$  превышает  $K_{\min}$  при  $R=2$  не более чем на 10% и стремится к 0 с ростом  $R$ . Величина эмпирически полученного значения  $F_{\text{ло}}$  в точке  $m_1[x]/M_0$  не превышает заданный порог и приближается к заданному теоретическому значению с ростом  $R$ .

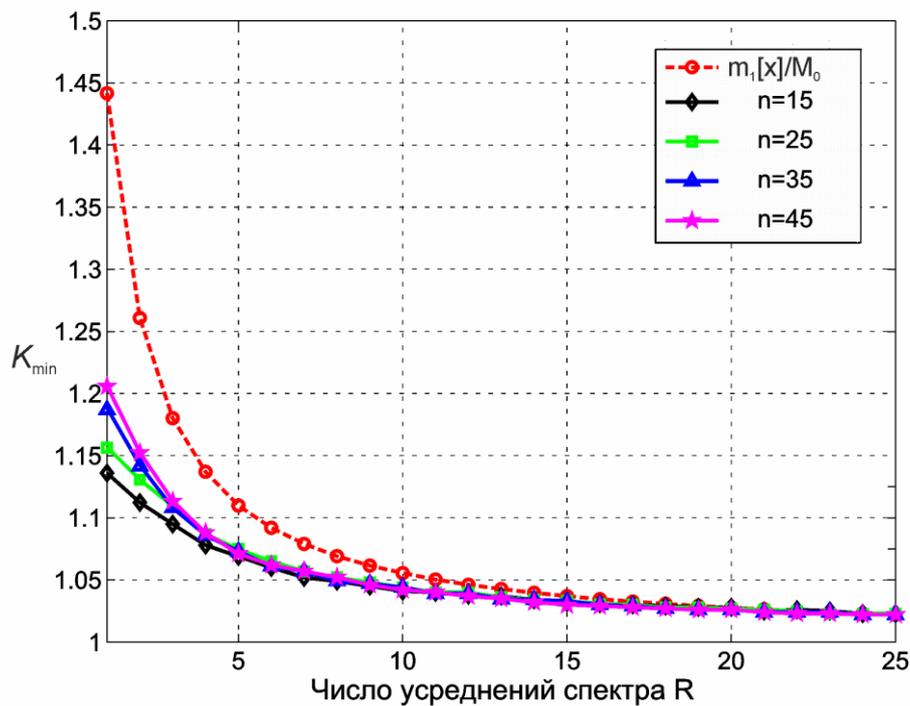


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента  $K_{\min}$  от числа усредненных спектров  $R$  для разных значений параметра  $n$

Таким образом, применение критерия Вилкоксона возможно для асимметричного распределения отсчетов спектра шума при замене медиан распределений в выражении (4) и последующих расчетах соответствующими математическими ожиданиями. Это может быть реализовано с помощью замены поправочного коэффициента и медианы на оценку среднего значения шумовых отсчетов –  $\tilde{m}_1[x_{uu}]$ , полученную одним из методов, описанных в работе:

$$x_i = x_i^* - \tilde{m}_1[x_{uu}], i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Правило обнаружения (5) с учетом (8) будем называть модифицированным критерием Вилкоксона.

Проанализирована зависимость вероятности ложного обнаружения  $F_{\text{ло}}$  от числа усредненных спектров  $R$  для разных значений параметра  $n$

модифицированного критерия. Показано, что при малом числе  $R$ , эмпирически полученное значение  $F_{ло}$  несколько меньше заданного уровня, что должно сказываться на увеличении вероятности пропуска сигнала. Однако существующие алгоритмы оценки мощности шума как среднего значения отсчетов энергетического спектра дают погрешности оценки. Так, например, при значении  $R=1$  ошибка оценки значения  $\tilde{m}_1[x_{uu}]$  может достигать 20% и уменьшается с ростом  $R$ . Таким образом, в самом худшем случае при заниженной оценке  $\tilde{m}_1[x_{uu}]$  на 20% для случая  $R=1$  вероятность ложного обнаружения для модифицированного критерия не превысит заданного значения.

Модифицированный критерий Вилкоксона работает эффективно при длине выборки  $n > 15$ , поэтому для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала необходимо более 15-ти спектральных отсчетов. Поэтому непосредственное применение критерия к спектральным отсчетам будет снижать разрешающую способность по частоте в 15 и более раз, что неприемлемо для практических приложений.

В связи с этим предлагается непараметрический АО сигналов, основанный на модифицированном критерии Вилкоксона. Блок-схема разработанного АО представлена на рис. 2.

Кроме того, в данной главе приводится сравнение и анализ эффективности разработанного АО по отношению к известному АО. В ходе анализа определено, что область наиболее эффективного применения предлагаемого алгоритма, по сравнению с известным АО, ограничивается определенным минимальным значением ширины полосы обнаруживаемых сигналов, выраженной в числе спектральных отсчетов –  $B$ , которая составляет 32 отсчета ДПФ. Основные преимущества разработанного алгоритма отражены в заключении.

**В третьей главе** представлена разработка комбинированного АО сигналов в широком диапазоне частот, основанная на усовершенствовании АО, представленного во второй главе. Основная идея комбинированного алгоритма заключается в том, что формирование занятых участков радиочастотного спектра строится на основе выходных данных разработанного непараметрического алгоритма и существующего точечного. Таким образом, удастся объединить преимущества обоих алгоритмов.

Проведен сравнительный анализ эффективности обнаружения разработанного АО с известным алгоритмом по различным типам синтезированных сигналов современных стандартов связи с цифровыми видами модуляции.

В качестве примера, на рис. 3 показаны характеристики обнаружения для сигнала, максимально приближенного к стандарту мобильной связи CDMA-2000.

В данном случае эффективность обнаружения непараметрического алгоритма при  $P_{обн} = 0,8$  и  $n = 30$  выше по ОСШ на 8 дБ и достигает 14 дБ при значении  $P_{обн} = 0,2$ . Эффективность обнаружения при значении  $n = 20$  несколько выше при значениях ОСШ  $-5..16$  дБ, однако падает при меньших значениях ОСШ

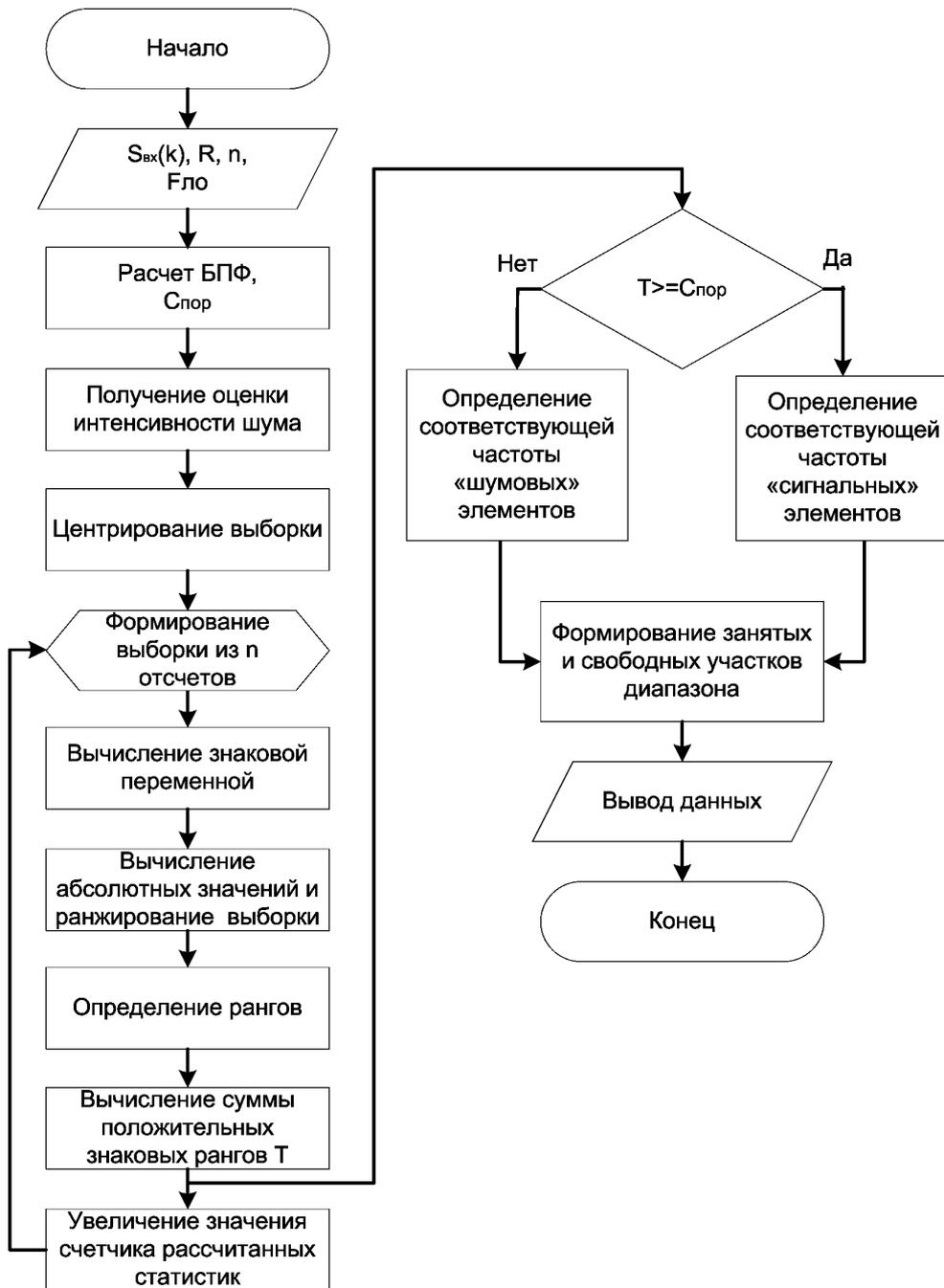


Рис. 2. Блок-схема непараметрического алгоритма обнаружения сигналов на основе модифицированного критерия Вилкоксона

по сравнению с характеристикой обнаружения при  $n=30$ . В работе установлено, что для разработанного алгоритма наиболее рационально использовать размер выборки  $n$  в диапазоне от 30 до 35.

Также проведен анализ зависимости  $P_{обн}$  от числа усреднений спектра  $R$ . Пример для сигнала стандарта мобильной связи CDMA-2000 показан на рис. 4. При числе усреднений  $R=2$  выигрыш в пороговом ОСШ по сравнению с характеристиками при отсутствии усреднения составляет: при  $P_{обн}=0,8$  – 4 дБ, а при  $P_{обн}=0,2$  – 2,5 дБ. Дальнейшее увеличение числа усреднений дает незначительный постоянный рост эффективности обнаружения, в среднем на 1 дБ для каждого последующего значения  $R$ .

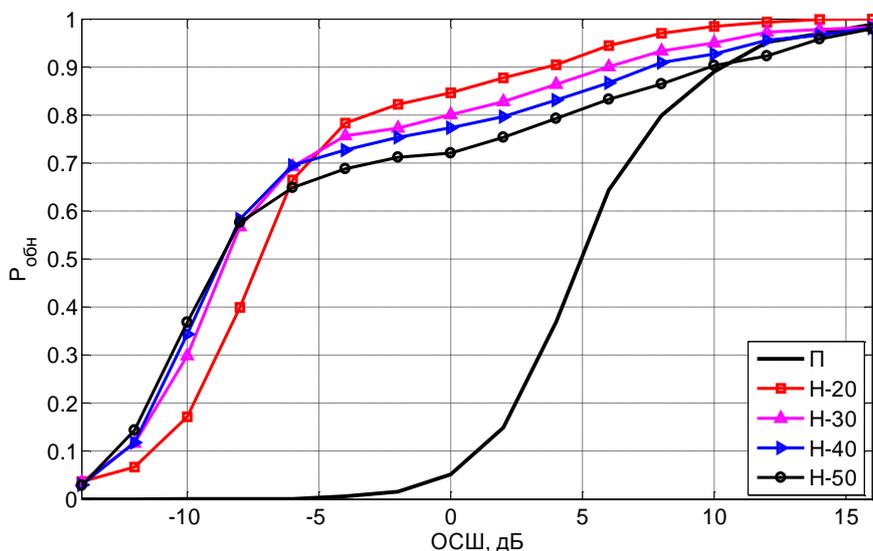


Рис. 3. Характеристики обнаружения сигнала стандарта мобильной связи CDMA-2000 для параметрического (П) и разработанного непараметрического (Н) алгоритмов

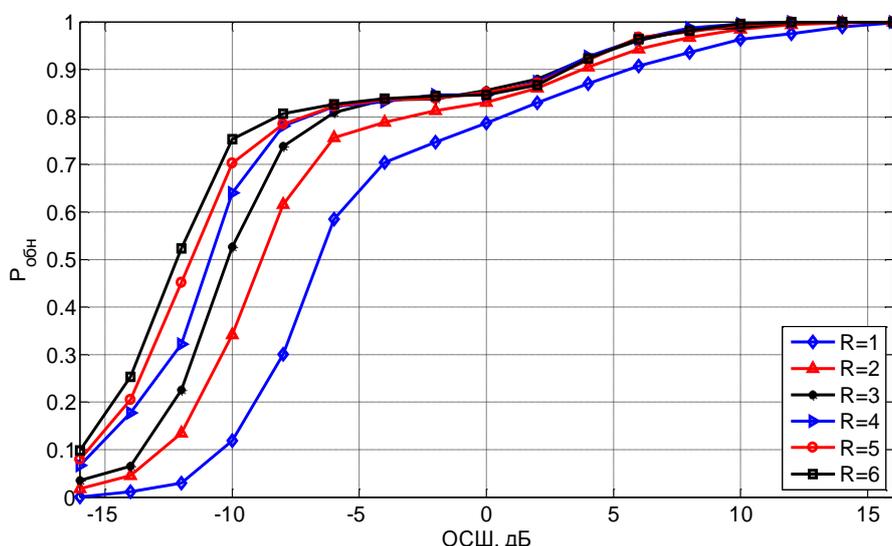


Рис. 4. Характеристики обнаружения сигнала стандарта мобильной связи CDMA-2000 разработанного непараметрического алгоритма для числа усредняемых спектров  $R$  от 1 до 6

Проведен анализ точности определения полосы, занимаемой обнаруженными радиосигналами, и методика ее оценки. В случае широкополосных сигналов применение существующих точечных АО приводит к формированию множества полос частот малой ширины и, как следствие, к ошибкам определения полосы обнаруживаемых радиосигналов. В качестве примера показаны результаты обнаружения одного канала базовой станции стандарта IMT-2000/UMTS (рис. 5). Поэтому, для исключения грубых ошибок, необходимо применение дополнительных методов оценки полосы радиосигналов. Показано, что для предложенных алгоритмов такой проблемы не наблюдается. Оценка занятых участков радиочастотного спектра в данном случае не требует дополнительных методов, что снижает общие вычислительные затраты при мониторинге спектра.

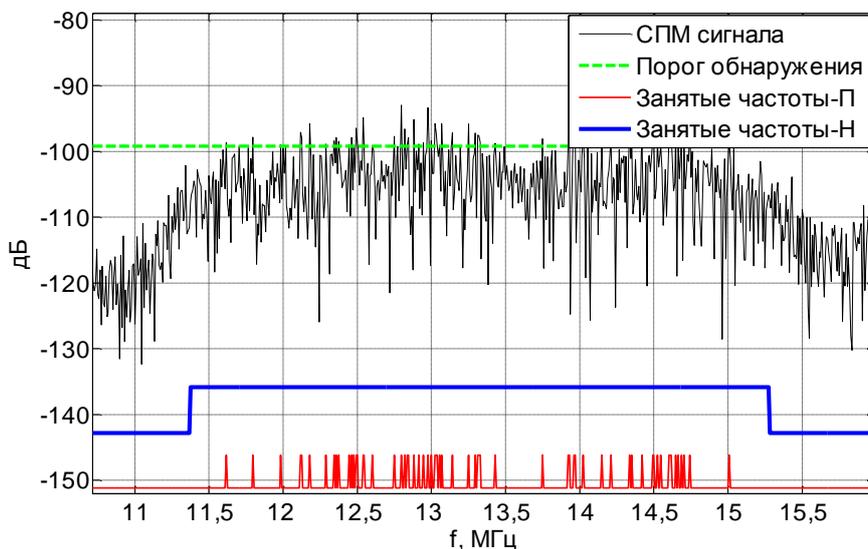


Рис. 5. Формирование занятой полосы частот параметрическим (П) и непараметрическим (Н) алгоритмами для широкополосного сигнала с низким отношением сигнал/шум

Сравнительный анализ точности определения полосы обнаруживаемых сигналов по выходным данным предлагаемого непараметрического алгоритма обнаружения и точечного алгоритма обнаружения показал, что ошибка определения полосы растет с уменьшением ОСШ (рис. 6).

В данном случае при ОСШ более  $-6$  дБ для предложенного алгоритма среднееквадратическое отклонение (СКО) полосы сигнала меньше на  $50$  кГц значения СКО для параметрического алгоритма, что соответствует  $\sim 10\%$  от полосы заданного сигнала. Требуемая точность определения полосы сигнала  $\pm 10\%$  предлагаемым алгоритмом сохраняется до значения ОСШ  $5$  дБ. При снижении ОСШ до уровня менее  $-6$  дБ наблюдается резкий рост СКО определения ширины сигнала параметрическим алгоритмом, при этом СКО для предлагаемого алгоритма не превышает  $40\%$ .

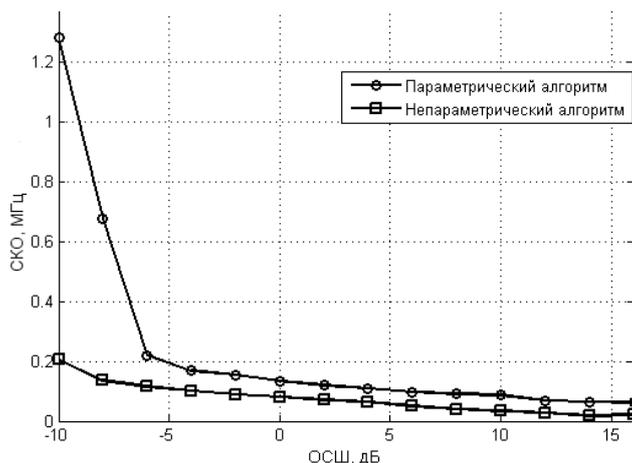


Рис. 6. Среднееквадратическое отклонение оценки полосы обнаруженного сигнала

Проведена апробация предлагаемых в работе АО на реальных сигналах в условиях полунатурного моделирования. Получены результаты, подтверждающие эффективность предлагаемых в работе решений.

На рис. 7 показаны результаты обнаружения сигналов стандарта GSM-900 в полосе частот 953–961 МГц. Видно, что предложенный алгоритм позволяет обнаруживать даже слабые сигналы, характеризуемые низким ОСШ, обнаружение которых параметрическим алгоритмом не представляется возможным, так как их спектральные отсчеты не превышают порог обнаружения.

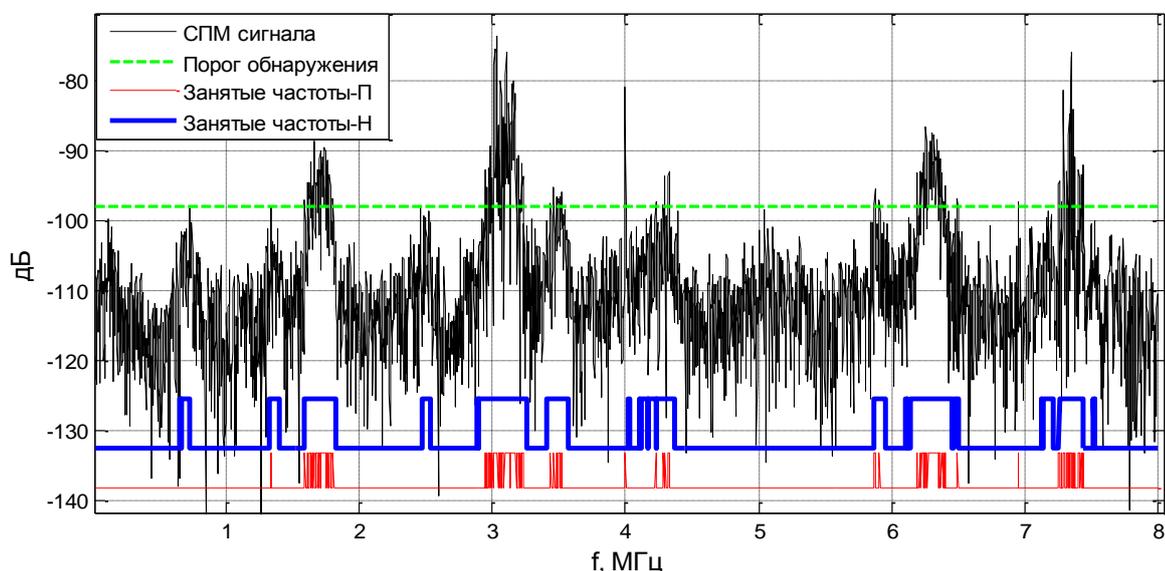


Рис. 7. Результаты обнаружения сигналов сотовой связи стандарта GSM-900 в полосе частот 953–961 МГц

Показано, что в коротковолновом диапазоне частот целесообразно применять разработанный комбинированный алгоритм, поскольку он позволяет обнаруживать все сигналы, действующие в полосе обзора, вне зависимости от ширины их полосы (рис. 8).

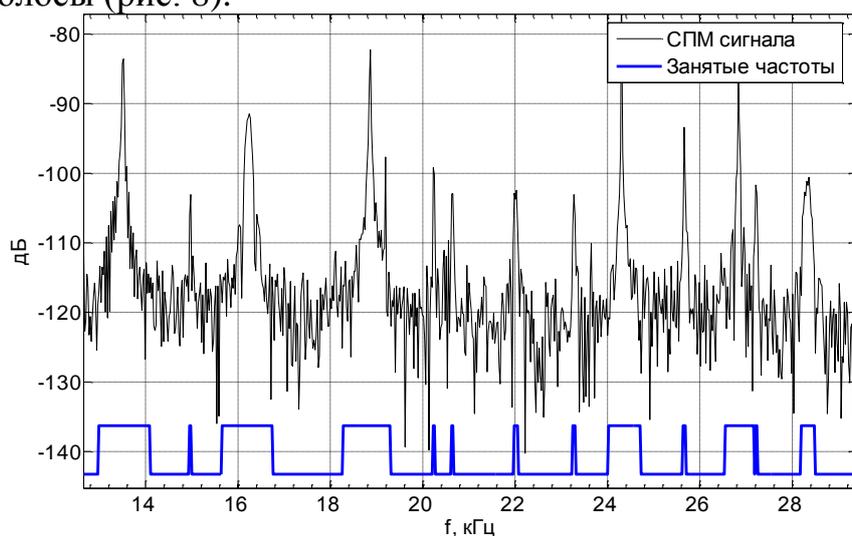


Рис. 8. Результаты обнаружения сигналов любительских радиостанций коротковолнового диапазона комбинированным алгоритмом в полосе частот 7012,8–7029,2 кГц

Кроме того, в работе рассматриваются вопросы практической реализации предлагаемых алгоритмов.

В ходе выполнения работы создан программно-аппаратный комплекс (ПАК) SDR-309-CR, который позволяет применять разработанные алгоритмы в реальных практических приложениях, а также проводить научно-исследовательские работы в области цифровой обработки радиосигналов в пакетах программ MATLAB и Simulink. В ходе разработки ПАК создана Simulink-модель, в которой реализованы разработанные в диссертации алгоритмы обнаружения сигналов. Кроме того, разработанные алгоритмы внедрены в стандартное программное обеспечение SDR# в виде собственного плагина «SignalDetection», написанного на языке C#.

**В заключении** подводятся итоги выполненной работы.

**В приложении** приведены копии актов о внедрении результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модификация непараметрического критерия Вилкоксона, позволяющая применять его для решения задачи обнаружения сигналов в частотной области на фоне шума с асимметричным видом плотности вероятности в условиях непараметрической априорной неопределенности.

2. Разработан непараметрический алгоритм обнаружения широкополосных сигналов на основе модифицированного критерия Вилкоксона, позволяющий определить «свободные» и «занятые» участки при мониторинге спектра в КР.

3. Разработана методика получения характеристик обнаружения методом статистического моделирования для проведения сравнительного анализа алгоритмов обнаружения.

4. Разработана научно-исследовательская программа, которая позволяет проводить анализ алгоритмов обнаружения радиосигналов по набору синтезированных сигналов с различными статистическими характеристиками, путем математического моделирования рассчитывать и отображать характеристики обнаружения, проверять работу алгоритмов обнаружения на записях реальных радиосигналов. Авторские права защищены свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5. Проведен сравнительный анализ эффективности обнаружения разработанного алгоритма с известным и применяемым на практике алгоритмом по основным типам синтезированных сигналов современных стандартов связи с цифровыми видами модуляции, в ходе которого определено, что эффективность предлагаемого алгоритма выше на 1..14 дБ в пороговом отношении сигнал/шум, в том числе:

– в случае обнаружения сигнала с GMSK модуляцией эффективность обнаружения предложенного алгоритма выше параметрического алгоритма обнаружения при вероятности обнаружения  $P_{обн} = 0,8$  на 6 дБ, а при значениях  $P_{обн} = 0,2$  – на 13 дБ;

– в случае обнаружения сигнала с QPSK модуляцией предложенный алгоритм демонстрирует преимущество по ОСШ при  $P_{обн} = 0,8$  в 5 дБ. При значении  $P_{обн} = 0,2$  выигрыш, также как и для сигнала с расширенным спектром методом прямой последовательности, составляет 14 дБ.

6. Эффективность обнаружения разработанным алгоритмом при наличии операции усреднения спектров значительно выше, чем при отсутствии усреднения. При двух усредняемых выборках энергетического спектра выигрыш в пороговом ОСШ увеличивается в среднем на 2 дБ при  $P_{обн} = 0,8$ . При дальнейшем увеличении  $R$  на 1 происходит рост эффективности в среднем на 1 дБ. Показано, что увеличение  $R$  более 6 нецелесообразно, поэтому при практической реализации алгоритма обнаружения рекомендуется выбирать значение  $R$  в диапазоне от 2 до 6.

7. Разработанный алгоритм в условиях отсутствия априорной информации о возможной ширине спектра сигналов позволяет получить оценку полосы обнаруживаемых сигналов без дополнительных методов с точностью  $\pm 10\%$  при значениях ОСШ не ниже 5 дБ. При меньших значениях ОСШ точность определения падает и при значении  $-10$  дБ составляет  $\pm 40\%$ .

8. Разработан комбинированный алгоритм обнаружения сигналов, объединяющий в себе преимущества существующего алгоритма обнаружения узкополосных сигналов и разработанного непараметрического алгоритма, эффективного при обнаружении широкополосных сигналов.

9. Проведена апробация предложенных алгоритмов обнаружения на реальных сигналах в диапазоне частот от 7 МГц до 2,5 ГГц, в том числе: радиостанций КВ диапазона, радиовещательных станций с частотной модуляцией, сигналах стандарта GSM, DVB-T2, CDMA2000, IMT-2000/UMTS. Полученные результаты подтвердили результаты исследований на синтезированных сигналах.

10. Создан программно-аппаратный комплекс SDR-309-CR, позволяющий применять разработанные алгоритмы обнаружения в реальных практических приложениях, а также проводить научно-исследовательские работы в области цифровой обработки радиосигналов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Стоянов Д.Д., Приоров А.Л., Дубов М.А. Применение одновыборочного критерия Вилкоксона для решения задачи обнаружения сигналов неизвестной формы в частотной области // Нелинейный мир. 2014. № 8. С. 3–9.

2. Стоянов Д.Д., Дубов М.А., Приоров А.Л. Модификация непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 2. С. 12–17.

### **Материалы российских и международных конференций**

3. Стоянов Д.Д. Анализ модифицированного непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов // Материалы Международной научно-практической конференции «Технические науки: теоретические и прикладные аспекты». Уфа, 2014. С. 52–56.

4. Стоянов Д.Д., Хрящев В.В. Алгоритм обнаружения широкополосных радиосигналов в когнитивных радиосистемах // Материалы XIX Международной

научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий». Новосибирск, 2014. С. 65–70.

5. Дубов М.А., Стоянов Д.Д. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения радиосигналов с цифровыми видами модуляции в когнитивных радиосистемах // Докл. междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий РЭУС-2014». Москва, 2014. С. 212–215.

6. Кокарев Н.В., Стоянов Д.Д., Дубов М.А., Приоров А.Л. GNU RADIO как основа малобюджетной SDR лаборатории // Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». Рязань, 2012. С. 255–256.

7. Полянин Ю.В., Дубов М.А., Стоянов Д.Д. Современный подход к проектированию радиотракта приемника МВ/ДМВ диапазона // Тезисы докл. XVIII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 2012. Т. 1. С. 72.

8. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Стоянов Д.Д., Брюханов Ю.А. Оценка вероятности битовой ошибки приема сигналов с квадратурной модуляцией неэталонными методами // Докл. 14-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2012). Москва, 2012. Т. 1. С. 173–177.

9. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Стоянов Д.Д. Особенности применения технологии SDR в средствах связи специального назначения // Материалы I Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны». Пенза, 2011. Ч. 1. С. 315–317.

10. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Будников И.А., Стоянов Д.Д. Анализ бюджетных программно-аппаратных платформ для изучения принципов SDR в университетах // Докл. 13-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2011). Москва, 2011. Т. 2. С. 265–267.

11. Дубов М., Полянин Ю., Стоянов Д. Анализ возможности применения концепции SDR в средствах связи специального назначения на примере радиостанции Р-612 // Тр. II междунар. молодеж. науч.-практ. конф. «Научно-практические исследования и проблемы современной молодежи». Казань-Елабуга, 2010. Т. 1. С. 126–130.

### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

12. Стоянов Д.Д. SignalDetecting – научно-исследовательская программа по изучению алгоритмов обнаружения радиосигналов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618161 от 12 августа 2014 г.

Подписано в печать «14» ноября 2014 г.  
Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз.

Ярославский государственный университет  
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.