

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Зламан Павел Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ И  
МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ПРИЕМНИКОВ ОБНАРУЖЕНИЯ  
РАДИОСИГНАЛОВ

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Таганрог - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности.

Научный руководитель: **Румянцев Константин Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Габриэльян Дмитрий Давидович**  
доктор технических наук, профессор,  
заместитель начальника НТК по науке  
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»  
(г. Ростов-на Дону)  
**Жук Александр Павлович**  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Организация и технология защиты информации» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь)

Защита состоится «14» сентября 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, и на сайте ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу <http://hub.sfedu.ru/diss/show/1311071/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ЮФУ801.02.07  
кандидат технических наук, доцент



Пилипенко А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Повсеместное использование и продолжающееся развитие радиоэлектронных и телекоммуникационных средств является причиной постоянного усложнения электромагнитной обстановки. Повышение помехоустойчивости радиотехнических устройств, в том числе радиоприемных устройств, является сложной комплексной задачей. Актуальность исследования проблемы обусловлена, в том числе и тем, что не существует общего подхода к решению этой задачи. Необходимо комплексное использование различных путей и средств для эффективного решения поставленной задачи (разработка новых алгоритмов обнаружения и обработки сигналов, разработка новых схемных решений построения приемников, использование современной технологии и современной элементной базы и т.д.). Среди наиболее существенных факторов, влияющих на эффективность современных радиотехнических систем, можно выделить помехоустойчивость. Вероятность правильного обнаружения сигнала, получение заданной точности оценки параметров сигнала, все это в значительной мере, зависит от помехоустойчивости приемных устройств. Поэтому поиск и исследование путей повышения помехоустойчивости приемных устройств радиотехнических систем различного назначения, в том числе радиоприёмных устройств для извлечения информации о параметрах радиолокационных и связанных сигналов, является актуальным в условиях сложной электромагнитной обстановки и постоянно ужесточающихся требованиях к уменьшению массогабаритных параметров.

Усовершенствование алгоритмов обнаружения импульсных радиосигналов и измерения несущей частоты проводится в направлении упрощения их практической реализуемости и снижению массогабаритных показателей при сохранении удовлетворительных значений основных параметров, таких как

- устойчивость к изменению уровня шума, обеспечивающую требуемую частоту ложных срабатываний;
- погрешность измерения несущей частоты, которая является одним из основных параметров, характеризующих сигнал.

В настоящей работе рассматривается задача обнаружения одиночных радиоимпульсов с неизвестными параметрами на фоне внутри приемных шумов, а также измерения несущей частоты радиоимпульсов, хотя многие результаты пригодны и для других ситуаций.

**Актуальность исследований** заключается в повышении помехоустойчивости радиоприёмных устройств обнаружения и извлечения информации о параметрах радиосигналов в условиях сложной помеховой обстановки, а также их миниатюризации за счет внедрения разработанных алгоритмов с учетом особенностей применения современной СВЧ элементной базы.

**Цель исследований** состоит в повышении помехоустойчивости радиоприёмных устройств обнаружения и извлечения информации о параметрах радиосигналов в условиях сложной помеховой обстановки, а также их миниатюризации за счет внедрения разработанных алгоритмов с учетом особенностей применения современной СВЧ элементной базы.

**Объектом исследований** являются приемные устройства обнаружения радиоимпульсов и измерения несущей частоты радиотехнических систем.

**Предметом** являются алгоритмы обнаружения и структура обнаружителей радиосигналов, алгоритмы оценки несущей частоты, способствующие повышению точности её измерения, структура измерителей несущей частоты, СВЧ узлы приемных устройств радиотехнических систем различного назначения.

**Общая научная задача:** исследование путей повышения помехоустойчивости и миниатюризация приемников обнаружения радиосигналов.

**Частные задачи диссертационных исследований:**

Разработка алгоритма обнаружения одиночных радиоимпульсов, позволяющего уменьшить объем шумовой выборки, относительно существующего аналога, предложение структуры рангового обнаружителя сигналов, реализующего данный алгоритм.

Разработка алгоритма обнаружения и структуры обнаружителя, в котором для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов. Алгоритм должен быть устойчив к изменению мощности помехи, сохраняя требуемый уровень ложных срабатываний.

Разработка алгоритма оценки несущей частоты импульсных радиосигналов на основе многоканального частотного дискриминатора.

Разработка алгоритма работы и структуры цифрового измерителя несущей частоты.

Проведение экспериментальных исследований СВЧ узлов приемника обнаружения, выдача рекомендаций по использованию современной элементной базы для разработки радиоприемных устройств. Результаты исследований должны обеспечить миниатюризацию приемного устройства обнаружения и при этом сохранить параметры, не уступающие существующим аналогам.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использованы общие методы системного анализа, методы теории обнаружения для разработки алгоритма обнаружения импульсного радиосигнала; аппарат математического анализа, теории вероятностей и математической статистики. Моделирование на ЭВМ и проведение экспериментов использованы для проверки теоретических результатов.

**Основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы:**

**Положение 1.** Исследование путей повышения помехоустойчивости и миниатюризация приемников обнаружения радиосигналов является актуальной задачей, так как существующие алгоритмы обнаружения радиосигналов и измерения несущей частоты, а также методы построения приемников обнаружения не обеспечивают заданные параметры и требуемое уменьшение массогабаритных показателей.

**Положение 2.** Применение разработанного рангового алгоритма обнаружения и предложенного рангового обнаружителя дает результат, не хуже перемешанного алгоритма Манна-Уитни, при изменении дисперсии шума, но при этом алгоритм требует меньший объем шумовой выборки, что позволяет уменьшить массогабаритные параметры приемника-обнаружителя.

**Положение 3.** Предложенный алгоритм обнаружения, основанный на методе частотно-временного контраста, устойчив к внешним воздействиям

(изменению мощности помехи), сохраняя требуемый уровень ложных срабатываний.

**Положение 4.** Предложенные алгоритмы и устройства измерения несущей частоты, основанные на методе частотной дискриминации и цифровом методе, обеспечивают необходимую для большинства приложений точность измерения, при которой СКО измерения частоты не более 1% от значения истинной частоты сигнала.

**Положение 5.** Использование особенностей применения современной элементной базы, выявленных в процессе экспериментальных исследований, для реализации СВЧ-узлов приемников позволяет снизить массогабаритные параметры приемников-обнаружителей радиоимпульсов.

**К наиболее существенным новым научным результатам, полученным в результате диссертационных исследований, относятся:**

ранговый алгоритм обнаружения одиночных импульсов для применения в одноканальных и многоканальных радиоприемных устройствах, обеспечивающий стабилизацию частоты ложных тревог;

алгоритм обнаружения, в котором для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов.

аналитические выражения для расчётов вероятностных характеристик обнаружителя на основе частотно-временного контраста;

алгоритм измерения несущей частоты на основе метода частотной дискриминации;

алгоритм цифрового анализа несущей частоты, основанный на быстром преобразовании Фурье с последующей интерполяцией;

рекомендации по использованию современной элементной базы, позволяющие снизить массогабаритные параметры и удешевить приемники обнаружения радиоимпульсов.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

Разработан новый ранговый алгоритм обнаружения, отличительной чертой которого является то, что он обеспечивает обнаружение одиночных радиоимпульсов и гарантирует стабильность частоты ложных тревог. Алгоритм позволяет значительно уменьшить объем шумовой выборки, относительно аналога, обеспечивая снижение массогабаритных показателей приемника обнаружителя.

Предложен новый алгоритм обнаружения, в котором для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов. Алгоритм устойчив к изменению мощности помехи, сохраняя требуемый уровень ложных срабатываний. Алгоритм учитывает неравномерность спектральной плотности шума по времени и по частоте.

Разработан алгоритм оценки несущей частоты импульсных радиосигналов на основе многоканального частотного дискриминатора, позволяющий строить приемники-измерители несущей частоты, обладающие большим динамическим диапазоном и не требующие ограничителей сигнала по входу. Разработан алгоритм оценки несущей частоты импульсных радиосигналов на основе БПФ с последующей интерполяцией, позволяющий существенно уменьшить

массогабаритные показатели аналоговой части приемника. Предложенные алгоритмы оценки частоты позволяют миниатюризировать разрабатываемые приемники обнаружения при сохранении параметров, не уступающих параметрам аналогов.

**Практическая значимость работы заключается в следующем:**

Применение рангового обнаружителя, разработанного на основе предложенного рангового алгоритма обнаружения, позволяет существенно сократить требуемый объем шумовой выборки по сравнению с перемешанным алгоритмом Манна-Уитни. Показано, что при изменении среднеквадратического отклонения шума в 33 раза от 30 мВ до 1000 мВ вероятность ложной тревоги возрастает всего в 10,8 раз. Предложенный ранговый обнаружитель одиночных импульсов может быть использован в одноканальных и многоканальных приемных устройствах для стабилизации частоты ложных тревог, а уменьшение объема шумовой выборки, ведущее к уменьшению количества линий задержки, позволяет значительно уменьшить массогабаритные показатели разрабатываемой аппаратуры обнаружения.

Предложены алгоритм обнаружения и структура обнаружителя, где для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов. При использовании предложенного алгоритма обнаружения вероятность ложной тревоги зависит только от размера опорной выборки и относительных коэффициентов усиления опорных каналов, но не зависит от априорно неизвестной дисперсии помехи. Предложенный обнаружитель при объеме выборки помехи 2 и более целесообразно использовать, когда необходимо получить более низкие вероятности ложной тревоги по сравнению с вероятностью ложной тревоги, получаемой при использовании обнаружителя частотного контраста с единичным объемом выборки. Получены аналитические выражения для расчётов вероятностных характеристик обнаружителя на основе метода частотно-временного контраста, которые позволяют сформулировать требования к идентичности опорных и анализируемого каналов.

Предложен алгоритм оценки несущей частоты импульсных радиосигналов при частотной дискриминации. Предложена аппроксимация амплитудно-частотных характеристик. Получены экспериментальные данные, позволяющие выбрать элементную базу для аналогово-цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов на выходе частотного дискриминатора. Применение алгоритма для построения измерителя частоты на выбранной элементной базе позволяет упростить структуру приемника и уменьшить массогабаритные показатели, при этом обеспечить среднеквадратическую ошибку (СКО) измерения частоты не более 0,66% от значения истинной частоты сигнала на 12 ГГц.

Предложен алгоритм цифрового анализа, основанный на быстром преобразовании Фурье с последующей интерполяцией и структура цифрового измерителя частоты, основанная на квадратурном преобразовании сигнала с переносом спектра на промежуточную частоту. Предложенный алгоритм

цифрового анализа обеспечивает СКО измерения частоты не более 0,06% от значения истинной частоты сигнала в диапазоне 12-18 ГГц.

Внедрение рекомендаций по использованию особенностей применения элементной базы в узлах СВЧ при разработке приемников радиосигналов, позволяет снизить массогабаритные параметры и удешевить разрабатываемые приемники.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационных исследований, посвященные анализу алгоритма оценки несущей частоты импульсных радиосигналов при частотной дискриминации, использованы при выполнении ОКР «АСОР-11356РО» «Разработка корабельного устройства освещения радиотехнической обстановки», проводимой НКБ «МИУС» ЮФУ и АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи».

Результаты диссертационных исследований, посвященные разработке и исследованию цифровых измерителей частоты, а также исследование особенностей применения современной элементной базы для реализации СВЧ-узлов приемников, использованы при выполнении: ОКР «БОПО» «Разработка беспосикового октавного приемника обнаружителя», проводимой НКБ «МИУС» ЮФУ и ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ (г. Курск).

**Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается** корректной постановкой цели и задачи исследования, строгостью применяемого математического аппарата, результатами вычислительного эксперимента, использование полученных результатов при разработке радиоприемных устройств.

**Апробация работы.** Основные положения научной работы докладывались и обсуждались на 3-х международных и одной всероссийской научно-технических конференциях:

First International Conference on Futuristic Trends in Network and Communication Technologies (FTNCT-2018). Department of Computer Science and Engineering, Jaypee University of Information Technology Waknaghat, Solan, Himachal Pradesh, India. February 9-10, 2018.

International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT 2018) 4 – 7 April 2018, Madrid, Spain.

III Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и производства». 20-21 января 2016 г., Кемерово.

XXXV Всероссийская научно-практическая конференция: «Научные дискуссии в области гуманитарных, естественнонаучных и технических аспектов современности». Ростов-на-Дону, 15 февраля 2022г.

**Публикации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 15 научных работ. Из них в перечне рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора технических наук, опубликовано 10 статей [1-10].

Три научные работы [11-13] опубликованы в изданиях, реферируемых в базе данных «SCOPUS». В реферируемых изданиях, учитываемых в РИНЦ, опубликованы 2 работы [14-15].

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует п. 3 («Разработка и исследование новых радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия, помехоустойчивости»); п.5 («Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки»); паспорта научной специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты, алгоритм обнаружения, метод повышения точности оценки несущей частоты радиосигналов, аналитические выражения, экспериментальные исследования СВЧ-узлов приемников, анализ результатов моделирования, приведенные в работе, получены автором лично.

**Структура диссертационной работы.** Диссертационное исследование написано на русском языке, включает введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы и приложение. Полный объем диссертации составляет 183 страницы, включая 112 рисунков и 28 таблиц. Список литературы содержит 211 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определены цель, предмет и объект исследований, научная задача, решению которой посвящена диссертационная работа, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены основные научные положения выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены тенденции развития аппаратуры приема радиоимпульсов радиотехнических систем. Проведен анализ радиоприемных устройств, рассмотрены сильные и слабые стороны различных схем построения РПУ, которые могут быть использованы при разработке РТС различного назначения. Показано, что существуют как явные преимущества, так и принципиально неустранимые недостатки, обусловленные структурой приемника, и выбор той или иной схемы необходимо делать исходя из конкретных условий и задач, которые предстоит решать приемному устройству. Проведен анализ особенностей обнаружения сигналов в современной помеховой обстановке. Показано, что в настоящее время обнаружение сигнала общепринято трактовать как статистическую задачу с априорной неопределенностью, выражающейся в том, что ряд параметров, а иногда и вид функции распределения шумов  $F_0(x)$  и смеси сигнала с шумом  $F_1(x)$  неточно известны и могут изменяться в процессе наблюдения. В этих условиях классические алгоритмы обнаружения, «специализированные», как правило, на нормальный шум, могут оказаться неэффективными. Обосновывается необходимость дальнейшего исследования и разработки алгоритмов обнаружения с постоянной частотой ложных тревог. Показана актуальность исследования особенностей практической реализации приемных узлов на современной элементной базе, т.к. развитие направления миниатюризации устройств СВЧ является одним из перспективных и в

наибольшей степени отвечающих требованиям, предъявляемым к современной аппаратуре. Разработка высокочастотной радиоаппаратуры в миниатюрном исполнении была и остается одной из важнейших задач в современной радиоэлектронике.

Актуальными задачами являются исследование и усовершенствование существующих алгоритмов обнаружения радиоимпульсов и измерения несущей частоты, а также разработка новых на основе проверенных подходов. Усовершенствование алгоритмов проводится в направлении упрощения их практической реализуемости при сохранении значений основных параметров соответствующим заданным величинам.

Основной интерес при проведении данной диссертационной работы представляет устройство для приема радиоимпульсов. Различные задачи, которые ставятся перед радиотехнической системой, являются причиной использования большого количества типов приемных устройств. Иногда требуется только обнаружение работающих радиоэлектронных средств. Для выполнения этой задачи можно использовать широкополосные одноканальные приемные устройства, полоса пропускания которых перекрывает весь частотный диапазон. Если необходимо получение более подробной информации о принятом сигнале, используются узкополосные приемники. Одной из важных функций многих радиотехнических систем, кроме обнаружения сигнала, является измерение его несущей частоты. Это определяет актуальность исследований алгоритмов обнаружения сигналов и измерения несущей частоты.

Сформулированы предмет, цель и научная задача, с определением частных задач исследования.

**Во второй главе** проводится исследование обнаружителей сигналов с постоянной частотой ложных тревог. Предложен ранговый алгоритм обнаружения одиночных импульсов, основанный на сумме рангов. Проведен анализ характеристик обнаружения в гауссовом приближении. Представлены расчетные и экспериментальные характеристики обнаружения. Проведено экспериментальное исследование качества стабилизации ложных тревог и разрешающей способности рангового обнаружителя одиночных импульсов. Предложен алгоритм обнаружения и структура обнаружителя, в котором для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов.

**Разработка и исследование рангового обнаружителя одиночных радиоимпульсов.** В результате проведенных исследований разработан ранговый алгоритм, основанный на сумме рангов. Разработанный алгоритм может быть использован при построении рангового обнаружителя одиночных радиоимпульсов.

Существует достаточно обширная литература, описывающая алгоритмы обнаружения не зависящие от распределения шума. Но большинство таких методов сложно реализуемы на практике. Одним из алгоритмов, получивших практическую реализацию, является ранговый алгоритм Манна-Уитни.

Предлагается новый ранговый алгоритм, удобный для использования в обнаружителях одиночных импульсов

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=\lambda(i-1)+1}^{M+\lambda(i-1)} U(x_i - y_j) \begin{matrix} H_1 \\ \geq C, \\ H_0 \end{matrix} \quad (1)$$

где  $x_i$  – элементы анализируемой выборки;

$y_i$  – элементы опорной выборки шума;

$N$  – число элементов в анализируемой выборке;

$M$  – число элементов в опорной выборке шума при формировании одного ранга;

$U(x_i - y_j)$  – ступенчатая функция;

$$U = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > y_j; \\ 0 & \text{при } x_i < y_j; \end{cases}$$

$H_1$  и  $H_0$  – гипотезы о наличии и отсутствии сигнала соответственно;

$C$  – порог обнаружения.

Можно отметить возможность обобщения  $W$ -статистики, в зависимости от параметра  $\lambda$ , в перемешанный или классический тест Манна-Уитни. Так, например, при  $\lambda=0$  имеем классический тест Манна - Уитни

$$W_{\lambda=M} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M U(x_i - y_j) \begin{matrix} H_1 \\ \geq C. \\ H_0 \end{matrix}$$

При  $\lambda = M$  из (1) имеем перемешанный тест Манна – Уитни

$$W_{\lambda=M} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=M(i-1)+1}^{M^*i} U(x_i - y_j) \begin{matrix} H_1 \\ \geq C, \\ H_0 \end{matrix}$$

При  $0 < \lambda < M$  из (1) получаются алгоритмы с меньшим объёмом шумовой выборки, чем перемешанный алгоритм Манна-Уитни, и с большим объёмом, чем классический тест Манна-Уитни.

Более "эффективным" является алгоритм при  $\lambda = 1$ . В этом случае ранги формируются, а не параллельно, как в классическом алгоритме Манна-Уитни, при этом объем шумовой выборки для него в  $M \cdot N / (M + N - 1)$  раз меньше, чем объем шумовой выборки для перемешанного алгоритма Манна-Уитни

$$W_{\lambda=1} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^{M+i-1} U(x_i - y_j) \begin{matrix} H_1 \\ \geq C. \\ H_0 \end{matrix}$$

Функциональная схема обнаружителя на основе  $W_1$ -статистики приведена на рисунке 1, где  $\tau_n$  – длительность импульса;  $\tau_k$  – интервал корреляции шума.

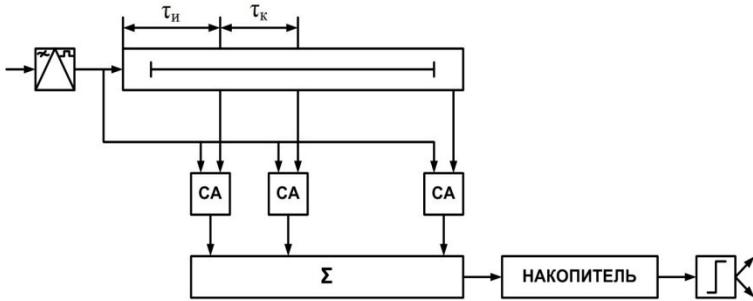


Рисунок 1 – Ранговый обнаружитель одиночных радиоимпульсов на основе  $W_1$  – статистики.

Вероятность правильного обнаружения в гауссовом приближении определяется формулой

$$P_D = 1 - \Phi\left(\frac{c - M_1(W_1)}{\sigma(W_1)}\right).$$

Во время проведения анализа обнаружителя на основе  $W_1$  – статистики, на тип распределения смеси сигнала и шума на входе обнаружения не накладывалось ограничений, кроме условия непрерывности.

Зависимость вероятности обнаружения  $D$  от ОСШ, для распределения Гаусса на выходе детектора, изображена на рисунке 2 (штриховые линии). Для сравнения на этом же рисунке приведена характеристика обнаружения обнаружителя, основанного на тесте Стьюдента.

**Исследование и разработка обнаружителя контраста в частотно-временной области.** При построении оптимальных обнаружителей необходимо знать статистические характеристики сигналов и помех. На практике эти характеристики бывают известны лишь частично.

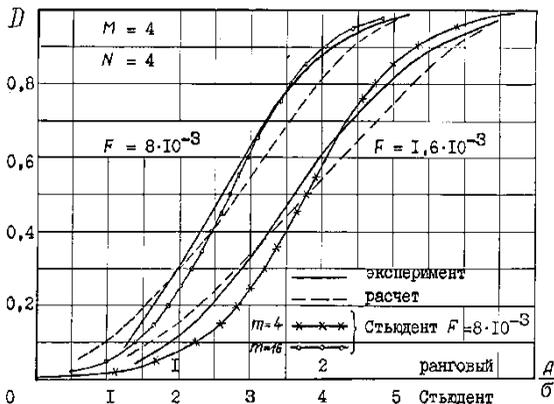


Рисунок 2 – Характеристики обнаружения рангового обнаружителя одиночных импульсов на основе  $W_1$  – статистики

В этом случае нередко используют неоптимальные обнаружители, инвариантные к неизвестным характеристикам помехи. Часто полагается, что закон распределения помехи известен с точностью до одного или нескольких параметров. Если неизвестным параметром является дисперсия помехи, то широкое применение нашли обнаружители, построенные по методу контраста. Наиболее часто анализируются обнаружители, использующие метод временного или частотного контраста. Причём обнаружители имеют лучшие характеристики обнаружения при увеличении объёма опорной выборки помехи. Поэтому представляется целесообразным провести анализ обнаружителя контраста, в котором одновременно для формирования опорной помеховой выборки используется как временное, так и частотное разделение процессов.

В предлагаемом алгоритме решение об обнаружении импульсного сигнала принимается при выполнении условия

$$\prod_{i=1}^N U(x_s - L_{n1}x_{n1i}) \cdot U(x_s - L_{n2}x_{n2i}) = 1. \quad (2)$$

где  $x_{n1i}$ ,  $i = 1, N$  – отсчёт выходного напряжения в  $i$ -й момент времени в 1-м опорном помеховом канале с полосовым фильтром (ПФ1);

$x_s$  – отсчёт выходного напряжения в сигнальном канале с полосовым фильтром (ПФ2), настроенном на частоту сигнала  $f_s$ ;

$x_{n2i}$ ,  $i = 1, N$  – отсчёт выходного напряжения в  $i$ -й момент времени во 2-м опорном помеховом канале с полосовым фильтром (ПФ3);

$L_{n1}$ ,  $L_{n2}$  – отношения коэффициентов передачи по напряжению опорных каналов помехи к коэффициенту передачи сигнального канала.

Использование алгоритма (2) целесообразно в многоканальных по частоте системах. Структурная схема обнаружителя, реализующего алгоритм (2), показана на рисунке 3.

Вероятность обнаружения для распределения Рэлея-Райса на выходе детектора можно определить по формуле

$$P_D = \exp(-q) \sum_{r=0}^N \sum_{k=0}^N \frac{C_N^k \cdot C_N^r \cdot (-1)^{k+r}}{\frac{k}{L_{n1}^2} + \frac{r}{L_{n2}^2} + 1} \exp\left(-\frac{q}{\frac{k}{L_{n1}^2} + \frac{r}{L_{n2}^2} + 1}\right),$$

где  $q = A^2/(2\sigma^2)$  – отношение сигнал/шум по мощности.

Вероятность ложной тревоги определяется по следующей формуле, полагая  $q=0$ :

$$P_F = \sum_{r=0}^N \sum_{k=0}^N \frac{C_N^k \cdot C_N^r \cdot (-1)^{k+r}}{\frac{k}{L_{n1}^2} + \frac{r}{L_{n2}^2} + 1}.$$

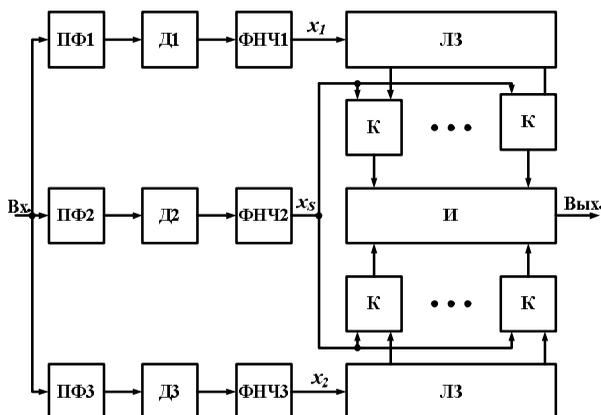


Рисунок 3 – Структурная схема обнаружителя, реализующего алгоритм (6): ПФ – полосовой фильтр; Д – детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; ЛЗ – линия задержки; К – компаратор; И – схема совпадений.

На рисунке 4а приведены кривые обнаружения при разном числе отсчётов  $N$  (объёма выборки) и  $L_{n1}=L_{n2}=1$ . Отметим, что кривой  $N=1$  соответствует вероятность ложных тревог  $P_F=1.67 \cdot 10^{-2}$ ,  $N=2 - P_F=6.67 \cdot 10^{-2}$ ,  $N=3 - P_F=3.57 \cdot 10^{-2}$ ,  $N=4 - P_F=2.22 \cdot 10^{-2}$ ,  $N=5 - P_F=1.51 \cdot 10^{-2}$ . Из анализа представленных кривых видно, что обнаружитель при  $N>1$  целесообразно использовать, когда необходимо получить более низкие значения вероятности ложной тревоги по сравнению с вероятностью ложной тревоги, получаемой при использовании обнаружителя частотного контраста ( $N=1$ ). На рисунке 4б изображен график зависимости вероятности ложной тревоги  $P_F$  от отношения коэффициентов передачи по напряжению опорных каналов помехи к коэффициенту передачи сигнального канала при условии  $L = L_{n1} = L_{n2}$ . Изменяя значения параметров  $L_{n1}$  и  $L_{n2}$ , можно оценить влияние идентичности каналов на стабилизацию вероятности ложной тревоги.

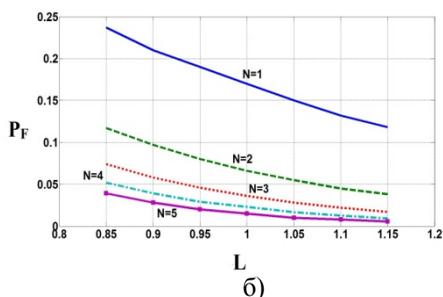
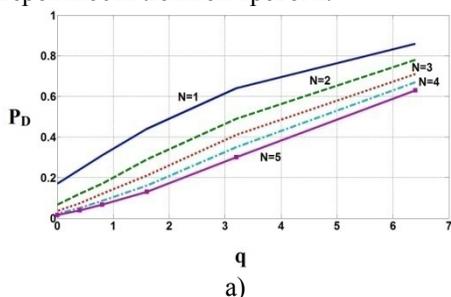


Рисунок 4 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал-шум  $q$  (а) и ложной тревоги от отношения коэффициентов передачи по напряжению опорных каналов помехи к коэффициенту передачи сигнального канала  $L$  (б), при различных объемах выборки  $N$ .

**Третья глава** посвящена исследованиям путей повышения точности измерения несущей частоты импульсных радиосигналов. Проведено исследование особенностей повышения точности оценки несущей частоты импульсных радиосигналов при измерении многоканальным методом. Проведен анализ алгоритма оценки несущей частоты импульсных радиосигналов при частотной дискриминации. Предложена аппроксимация амплитудно-частотных характеристик дискриминатора, разработан алгоритм измерения несущей частоты. Предложена схема построения цифрового измерителя частоты основанная на квадратурном преобразовании сигнала с переносом спектра на промежуточную частоту и алгоритм цифрового анализа, основанный на быстром преобразовании Фурье с последующей интерполяцией.

**Анализ алгоритма оценки несущей частоты импульсных радиосигналов при частотной дискриминации.** Проведено экспериментальное исследование важной составной части приемника обнаружения сигналов – частотного дискриминатора.

В качестве объекта исследования рассмотрен многоканальный частотный дискриминатор амплитудного типа. Рассмотренный частотный дискриминатор используется в широкополосной системе обнаружения сигналов.

К частотному дискриминатору (ЧД) предъявлены следующие требования:

- диапазон рабочих частот 8-12 ГГц;
- вероятность наложения двух импульсов с разными частотами близка к нулю;
- минимальная длительность импульсов 0,1 мкс;
- среднеквадратическая погрешность оценки несущей частоты импульсных сигналов не более 80 МГц;
- число шкал – 3;
- ЧД должен иметь канал обнаружения с максимально плоской АЧХ.

В соответствии с этими требованиями разработана функциональная схема частотного дискриминатора, показанная на рисунке 5.

Частотный дискриминатор функционально состоит из трех частей: точного дискриминатора, грубого дискриминатора и дискриминатора средней точности.

Дискриминационную характеристику точной шкалы можно аппроксимировать выражением:

$$K \left( \frac{U_1 - U_2}{U_3} \right) = \cos \left( \frac{(f - f_n)}{\Delta f} * \pi \right), \quad (3)$$

где  $U_1, U_2$  - напряжения на выходах детекторов точной шкалы;

$U_3$  - напряжение на выходе канала обнаружения;

$K$  – коэффициент, обеспечивающий условие нормировки:

$$\max \left| \frac{U_1 - U_2}{U_3} \right| * K = 1,$$

$f$  – текущая частота;

$f_n$  – начальная частота;

$\Delta f$  – частотный интервал, равный половине периода косинусоиды.

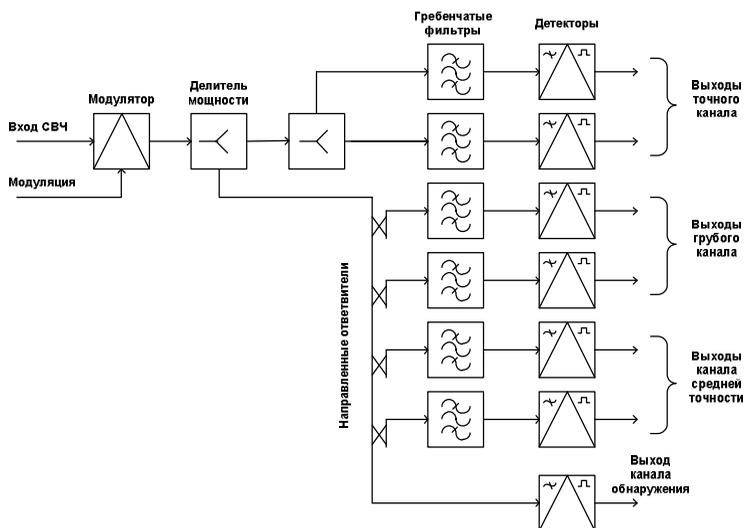


Рисунок 5 – Функциональная схема частотного дискриминатора

Алгоритм работы многоканального ЧД представляет собой функцию, обратную дискриминационной характеристике. При обращении функции (3) учтена её периодичность. Кроме того, отдано предпочтение разбиению аргумента на участки, соответствующие монотонности функции (3).

Тогда алгоритм работы многошкального ЧД имеет вид:

$$\hat{f}_x = f_H + \left(n - \frac{1}{2}\right) \Delta f + \frac{\Delta f}{\pi} (-1)^n * \arcsin \left( \frac{U_1 - U_2}{U_3} * k \right),$$

где  $\hat{f}_x$  - оценка несущей частоты;

$n$  – номер полупериода косинусоиды, задействованного на данном шаге измерений, может принимать значения от 1 до  $n_{\max}$  (см. ниже). Вычисляется  $n$  с помощью грубой шкалы.

$U_1$  – выход первого детектора точного канала;

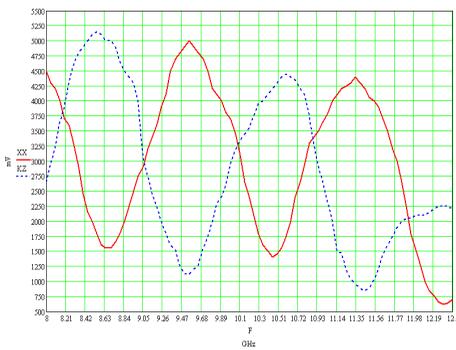
$U_2$  – выход второго детектора точного канала;

$U_3$  – выход детектора канала обнаружения;

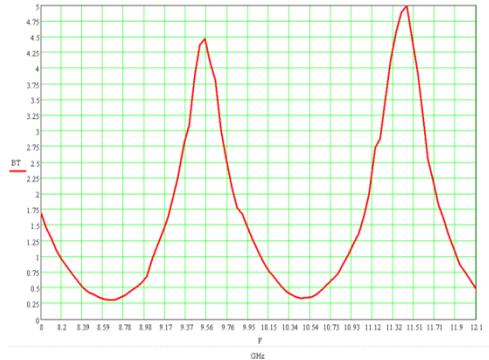
$k$  – коэффициент, обеспечивающий условие нормировки.

Для устранения зависимости частотных характеристик от мощности входного сигнала, уменьшения влияния большого КСВН на монотонность кривых АЧХ, в приемнике используется отношение двух сигналов, т. е.  $U_{V3}/U_{V4}$ ;  $U_{V7}/U_{V8}$ ;  $U_{V5}/U_{V6}$ . (рисунок 6).

**Разработка и исследование цифровых измерителей несущей частоты на основе БПФ.** В настоящее время цифровые методы обработки информации, включающие в себя преобразование сигналов в цифровую форму и последующую обработку дискретных аналогов сигналов с целью определения их параметров, выходят на передовые позиции среди известных альтернативных методов определения параметров сигналов.



а)



б)

Рисунок 6 – Частотные характеристики точных каналов: измеренные АЧХ точных каналов (а), отношение измеренных АЧХ (б)

Для исследования был выбран способ квадратурного преобразования сигнала с переносом спектра на промежуточную частоту. Это обусловлено, прежде всего, достаточно высокой средней частотой и широкой полосой анализа - диапазон рабочих частот составляет 850...18000 МГц.

Алгоритм цифрового анализа реализован на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) и обеспечивает измерение несущей частоты. Функционально устройство, реализующее данный алгоритм, представляет собой последовательно соединенные устройство переноса спектра сигналов из диапазона частот 850...18000 МГц в диапазон промежуточных частот 125-250 МГц и устройство аналого-цифрового преобразования и вычисления параметров сигналов (рисунок 7).

Алгоритм цифрового анализа основывается на быстром преобразовании Фурье и последующей интерполяцией.

Алгоритм включает в себя следующую последовательность действий:

- оцифровка сигнала и накопление отчетов за заданный период;
- проверка условия: если длительность выборки меньше 128 отсчетов, то размер БПФ  $M=128$  точек, в другом случае  $M$  делаем равным ближайшему значению степени 2;
- операция БПФ размерности  $M$ ;
- поиск максимума отсчета  $i$ ;
- интерполяция результатов параболической функцией через точки  $[i-1; i+1]$ ;
- уточнение максимума;
- вывод найденной частоты.

Для оценки статистических величин использовалась выборка, полученная в результате проведения 10000 измерений при различных временных реализациях шума. В ходе экспериментов оценивалось СКО ошибки, максимальная ошибка и среднее значение ошибки. На рисунке 8 показаны результаты машинного эксперимента для алгоритма при длительности сигнала и длительности строба измерения 0,1 мкс.

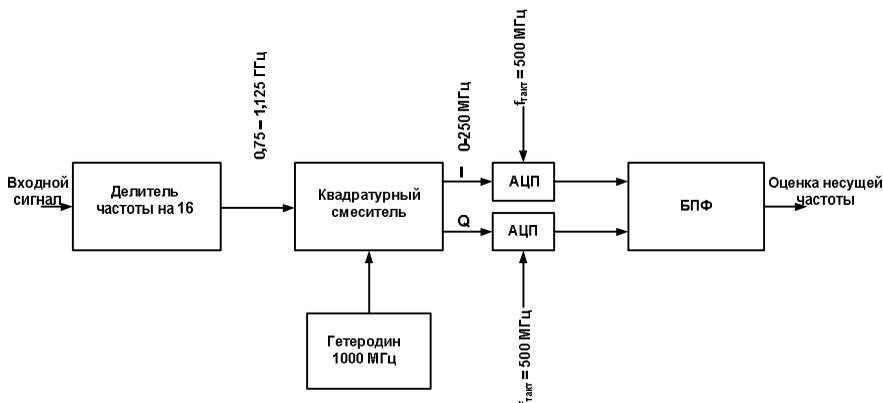


Рисунок 7 – Структурная схема, реализующая алгоритм цифрового измерения частоты

Использование предложенного алгоритма обеспечивает приемлемую для большинства приложений среднюю квадратическую ошибку измерения. Основными источниками погрешностей, при практическом применении будут служить: погрешность алгоритма, зависящая от ОСШ и длительности сигнала, погрешность установки частоты генераторов. При этом практически равное влияние имеют погрешности установки частоты как генератора для квадратурного детектора, так и генератора для тактирования АЦП.

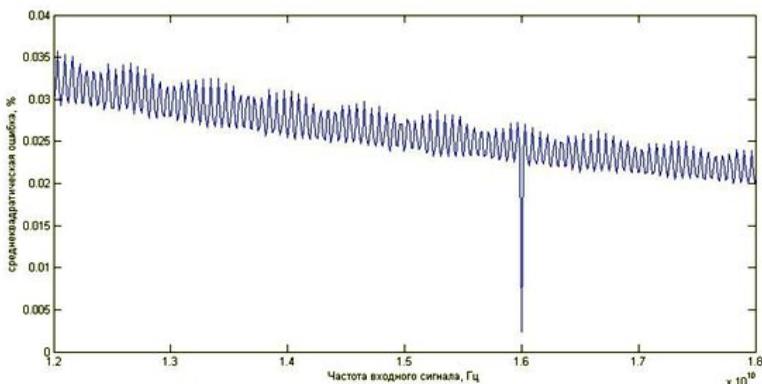


Рисунок 8 – Среднеквадратическое отклонение сигнала ошибки измерения несущей частоты входного колебания

Исследования **четвёртой главы** посвящены особенностям реализации ВЧ части приемника радиоимпульсов с использованием современной элементной базы. Целью исследования главы является дополнительное изучение отдельных узлов СВЧ для выработки рекомендаций по их применению, рассмотрению новых способов построения схем с применением устройств диапазона СВЧ.

Проведено исследование некоторых СВЧ-узлов приемника радиоимпульсов, представляющих большой практический интерес.

При разработке современных РТС немаловажное значение имеет выбор элементной базы. Современная промышленность выпускает элементную базу, которая позволяет улучшить характеристики приемной аппаратуры.

Решение задач уменьшения их габаритов и массы, повышение надежности работы, помехоустойчивости, устойчивости к воздействию внешних дестабилизирующих факторов в значительной мере зависят от успехов в области создания новых более совершенных СВЧ-компонентов.

В работе проведено исследование СВЧ-узлов приемника радиоимпульсов таких как:

- сверхширокополосный детектор СВЧ-диапазона;
- делитель частоты;
- синтезатор частоты;
- смесители СВЧ-диапазона.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке радиоприемных устройств извлечения информации.

В таблице 1 приведено сравнение реальных приемных устройств, разработанных с использованием результатов исследований, проводившихся в научной работе.

На основе анализа данных, представленных в таблице 1 можно сделать вывод, что приемные устройства, разработанные с использованием результатов исследований (пункты 1 и 2 таблицы 1), по массогабаритным параметрам сопоставимы с существующими аналогами, а в некоторых случаях превосходят их.

Таблица 1 Справочные данные приемников-измерителей частоты

№ п/п	Тип приемника	Массогабаритные характеристики, мм, (кг)	Общая трудоемкость ч/ч	Примечание
1	На основе частотного дискриминатора (диапазон 8-12 ГГц)	261x170x30 (0,510)	396	Серийный
2	Цифровой приемник на делителях частоты (ячейка ПРМ + ячейка ЦОС) (диапазон 8-12 ГГц)	228x261x60 (1,5) 250x128x40 (1,1)	751	Серийный
3	На фазовых детекторах с линией задержки	58x210x469 (3,5)	1612	Серийный
4	Многоканальный приемник (модуль усиления + модуль ПРМ)	50x178x240 (0,7) 50x178x240 (0,89)	753	Серийный
5	Цифровой приемник на делителях частоты	30x262x190 (0,8)	473	Эскизный

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой алгоритмов обнаружения радиоимпульсов и измерения несущей частоты, а также миниатюризацией приемников обнаружения радиоимпульсов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан ранговый алгоритм, основанный на сумме рангов, предложена структура обнаружителя одиночных радиоимпульсов. Применение рангового обнаружителя, разработанного на основе предложенного рангового алгоритма обнаружения, позволяет существенно сократить требуемый объем шумовой выборки по сравнению с перемешанным алгоритмом Манна-Уитни. Проведено экспериментальное исследование качества стабилизации ложных тревог, которое показывает, что при изменении среднеквадратического отклонения шума в 33 раза от 30 мВ до 1000 мВ вероятность ложной тревоги возрастает всего в 10,8 раз. Предложенный ранговый обнаружитель одиночных радиоимпульсов может быть использован в одноканальных и многоканальных приемных устройствах для стабилизации частоты ложных тревог, а уменьшение объема шумовой выборки, ведущее к уменьшению количества линий задержки, позволяя значительно уменьшить массогабаритные показатели разрабатываемой аппаратуры обнаружения.

Проведен анализ характеристик обнаружения в гауссовом приближении. Проведено сравнение с равномерно наиболее мощным алгоритмом обнаружения (тестом Стьюдента). Показана плата непараметрического алгоритма за универсальность применения по сравнению с алгоритмом Стьюдента, которая по пороговому сигналу равна 1 дБ при объемах опорной и анализируемой выборок равном 4, вероятности правильного обнаружения  $P_D=0,9$  и вероятности ложной тревоги  $P_{\text{лт}}=0,008$ . Экспериментальное исследование обнаружителя, реализующего предложенный ранговый алгоритм, показывает, что разница в пороговом сигнале между результатами расчета и эксперимента составляет менее 0,33 дБ.

2. Предложены алгоритм обнаружения и структура обнаружителя, в котором для формирования опорной выборки помехи используется как временное, так и частотное разделение процессов. При использовании предложенного алгоритма обнаружения вероятность ложной тревоги зависит только от размера опорной выборки и относительных коэффициентов усиления опорных каналов, но не зависит от априорно неизвестной дисперсии помехи. Предложенный обнаружитель при объеме выборки помехи не менее двух целесообразно использовать, когда необходимо получить более низкие значения вероятности ложной тревоги по сравнению с вероятностью ложной тревоги, получаемой при использовании обнаружителя частотного контраста с одной выборкой. Также получены аналитические выражения для расчётов вероятностных характеристик обнаружителя на основе метода частотно-временного контраста, которые позволяют сформулировать требования к идентичности опорных и анализируемого каналов.

3. Предложен алгоритм оценки несущей частоты импульсных радиосигналов

при частотной дискриминации. Предложена аппроксимация амплитудно-частотных характеристик, помогающая упростить математический расчет алгоритма измерения несущей частоты. Применение алгоритма для построения измерителя частоты позволяет упростить структуру приемника и уменьшить массогабаритные показатели, при этом обеспечить среднеквадратическую ошибку (СКО) измерения частоты не более 0,66% от значения истинной частоты сигнала на частоте 12 ГГц.

4. Проведено исследование цифровых измерителей несущей частоты на основе БПФ. В результате исследования предложен алгоритм цифрового анализа, основанный на быстром преобразовании Фурье с последующей интерполяцией и схема построения цифрового измерителя частоты, основанная на квадратурном преобразовании сигнала с переносом спектра на промежуточную частоту. Предложенный алгоритм цифрового анализа обеспечивает СКО измерения частоты не более 0,06% от значения истинной частоты сигнала в диапазоне 12-18 ГГц и позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели аналоговой части приемника

5. Результаты проведенных исследований особенностей применения современной элементной базы СВЧ могут быть использованы в качестве рекомендаций и справочной информации при проектировании приемников обнаружения и измерения параметров РТС различного назначения. Использование современной элементной базы позволяет в значительной степени снизить массогабаритные параметры приемников их отдельных узлов, а также снизить стоимость и трудозатраты разрабатываемых устройств. В качестве примеров можно указать: исследованный детектор, который имеет преимущество перед аналогами по габаритным размерам в 1,5-2,3 раза; приемник на основе частотного дискриминатора, в котором применен исследованный детектор, в бескорпусном исполнении, имеет преимущества по массогабаритным параметрам (по массе в 1,5 раза) и по трудозатратам.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых журналах из списка ВАК РФ (на момент публикации)**

1. Зикий, А. Н. Многоканальный частотный дискриминатор трехсантиметрового диапазона / А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12, – № 1. – С. 107-116.

2. Зикий, А. Н. Разрешающая способность рангового обнаружителя / А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3(46). – С. 32. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4357> (дата обращения 05.08.2022).

3. Зикий, А. Н. Ранговый обнаружитель одиночных импульсов / А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9(182). – С. 113-121. – DOI 10.18522/2311-3103-2016-9-113121.

4. Делитель частоты на 32 / А. В. Андрианов, А. Н. Зикий, П. Н. Зламан [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2(45). – С. 23.– Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4204> (дата обращения 05.08.2022).

5. Детекторы фирмы АЭРОФЛЕКС / Д. Е. Губарев, А. Н. Зикий, П. Н. Зламан, С. О. Мамченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 52. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2017/4409> (дата обращения 05.08.2022).

6. Серийные детекторы СВЧ (обзор) / В. П. Бутков, Д. Е. Губарев, А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1(44). – С. 13. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N1y2017/4032>. (дата обращения 05.08.2022).

7. Бутков, В. П. Сверхширокополосный детектор / В. П. Бутков, А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, – № 2. – С. 111-116.

8. Андрианов, А. В. Экспериментальное исследование смесителя на микросхеме LTC5553 / А. В. Андрианов, А. Н. Зикий, П. Н. Зламан // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – Т. 14, – № 1. – С. 68-74.

9. Зикий, А. Н. Исследование динамического диапазона смесителя по комбинационным составляющим / А. Н. Зикий, А. В. Андрианов, П. Н. Зламан // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, – № 2. – С. 74-78.

10. Зикий, А. Н. Пятиоктавный синтезатор частот / А. Н. Зикий, П. Н. Зламан, Д. В. Власенко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, – № 4. – С. 31-36.

#### **В международных научных изданиях, индексируемых Scopus:**

11. Rumyantsev, K. Detection of Signals by the Frequency-Time Contrast Method / K. Rumyantsev, A. Zikiy, P. Zlaman // Communications in Computer and Information Science (см. в книгах). – 2019. – Vol. 958. – P. 85-94. – DOI 10.1007/978-981-13-3804-5\_7.

12. Experimental investigation of the LTC5553 microcircuit in the frequency multiplication mode / K. Y. Rumyantsev, A. N. Zikiy, P. N. Zlaman, S. O. Mamchenko // International Journal of Engineering and Technology(UAE). – 2018. – Vol. 7, – No 3.13 (Special Issue 13). – P. 41-43.

13. Zikiy, A. Wideband centimetre range detector / A. Zikiy, P. Zlaman, K. Rumyantsev // E3S Web of Conferences –2020. – P. 01034. – DOI 10.1051/e3sconf/202022401034.

#### **В прочих изданиях:**

14. Зламан, П. Н. Экспериментальное исследование микросхемы LTC5553 в режиме умножения частоты с направленным ответвителем / П. Н. Зламан, А. В. Андрианов, А. Н. Зикий // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16, – № 1. – С. 106-111. – DOI 10.17122/1999-5458-2020-16-1-106-111.

15. Зламан, П. Н. Цифровой измеритель несущей частоты на основе БПФ / П. Н. Зламан // Дискуссии в области гуманитарных, естественно-научных аспектов современности: материалы XXXV Всероссийской научно-практической конференции, Симферополь, 15 февраля 2022 года.: в 2 ч. Ч. 1. – Ростов-на-Дону: Профпресслит; Манускрипт, 2022. – С. 286-291.

Зламан Павел Николаевич  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ И  
МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ПРИЕМНИКОВ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ  
Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать 18.05.2023 г.  
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз.  
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 9040

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции  
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.