

На правах рукописи



НГУЕН Чонг Куанг

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ С ПОСТОЯННЫМ
ЗНАЧЕНИЕМ ОШИБКИ ПЕРВОГО РОДА**

Специальности:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

2.2.16. Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель: **Белокуров Владимир Александрович,**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры радиотехнических систем ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф.
Уткина», г. Рязань.

**Официальные
оппоненты:** **Николаев Алексей Владимирович,**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник лаборатории «Компьютерных
систем автоматизации производства и
цифровых технологий» ИМАШ РАН, г.
Москва;

Подстригаев Алексей Сергеевич,
доктор технических наук, начальник научно-
исследовательской лаборатории АО «НИИ
«Вектор», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тульский государственный
университет», г. Тула.

Защита состоится «20» февраля 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» или на
сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 202_ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время разработано большое количество различных алгоритмов стабилизации ошибки первого рода, предназначенных для эффективного функционирования, как в многоцелевой обстановке, так и в условиях нестационарных негауссовских шумов. Каждый из указанных алгоритмов обладает определёнными достоинствами и ограничениями, связанными со стабилизацией ошибки первого рода в условиях шума и помех, эффективностью обнаружения объектов, а также с вычислительной сложностью при реализации в режиме реального времени. Выбор конкретного алгоритма стабилизации ошибки первого рода определяется спецификой радиотехнической задачи, статистическими характеристиками шума и помех, а также требованиями к точности, скорости обработки и ресурсоёмкости вычислительной платформы.

Алгоритмы стабилизации ошибки первого рода были тщательно исследованы многими авторам, такими как, П.А. Бакулев, С.Н. Жиганов, В.И. Кошелев, И.Б. Власов, К.Ю. Гаврилов, Ю.Г. Сосулин, В.В. Сутормин, С.Ю. Седышев, А.А. Трухачев, В.Т. Царенко, В.М. Зинчук, И.Ф. Лозовский, Б.И. Шахтарин, А.А. Тунгушпаев, В.С. Безяев и др, а также зарубежных авторов A. Richards, H. Rohling, P.P. Gandhi, C.H. Lim, R.S. Blum, A.K. Anatolii, L.A. Panzhi, S.A. Peng, E. Conte, S.D. Himonas, B.Z. Xu, C.J. Kim, S.K. Mustafa, A.A. Belouchrani, S.W. Hong и др.

Анализ и исследование существующих источников показали, что алгоритмы стабилизации ошибки первого рода получили широкое распространение благодаря высокой эффективности при обнаружении объектов на фоне стационарного шума. К основным преимуществам данных алгоритмов следует отнести их способность адаптивно формировать порог обнаружения на основе статистической оценки параметров шума в пределах «скользящего окна», что обеспечивает стабилизацию ошибки первого рода и повышает вероятность обнаружения. Тем не менее, при обнаружении объекта в условиях нестационарного шума эффективность известных алгоритмов стабилизации ошибки первого рода существенно снижается. Указанные ограничения свидетельствуют о необходимости разработки алгоритмов стабилизации ошибки первого рода, способных стабилизировать ошибку первого рода в условиях нестационарного шума в пределах «скользящего окна». Из анализа рассмотренных источников можно сделать следующие выводы:

- изменение среднего значения шума в пределах «скользящего окна» не учитывается;
- алгоритмы стабилизации ошибки первого рода требуют существенных вычислительных затрат.

Кроме того, для некоторых алгоритмов стабилизации ошибки первого рода необходимо априорное знание наклона прямой, аппроксимирующей изменение среднего значения шума.

Таким образом, актуальной является задача разработки алгоритмов стабилизации ошибки первого рода, обеспечивающих стабилизацию ошибки

первого рода на фоне шума, среднее значение которого изменяется в пределах «скользящего окна». Предлагаемые в диссертации алгоритмы не требуют априорного знания наклона аппроксимирующей прямой и предварительного формирования карты помех. Более того, изменение среднего значения шума может быть аппроксимировано кривыми более высокого порядка.

При обнаружении объектов на фоне нестационарного шума предлагаемые алгоритмы стабилизации ошибки первого рода обеспечивают выигрыш в пороговом отношении сигнал–шум по сравнению с известными алгоритмами. Кроме того, время выполнения предлагаемых алгоритмов значительно меньше, чем у известного алгоритма. Предлагаемые алгоритмы позволяют адаптивно обнаруживать объекты на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна».

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка эффективных алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих стабилизацию ошибки первого рода при работе как на фоне стационарного, так и нестационарного шума.

Учитывая поставленную цель, в работе формулируются основные исследовательские задачи.

1. Вычисление аналитических выражений плотности распределения вероятностей оценок коэффициентов полинома, который используется для аппроксимации изменения среднего значения шума в пределах «скользящего окна».
2. Разработка аналитических выражений для вероятности ложной тревоги при сегментации выборки «скользящего окна».
3. Разработка алгоритма выбора модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего окна».
4. Разработка алгоритма стабилизации ошибки первого рода с проверкой стационарности шума в пределах «скользящего окна» и определение критерия выбора модели аппроксимации изменения среднего значения шума.
5. Проведение экспериментальных исследований предлагаемых алгоритмов стабилизации ошибки первого рода и их последующее внедрение.

Объект исследования. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода при обнаружении сигналов на фоне как стационарного, так и нестационарного шума.

Предмет исследования. Методы и принципы построения алгоритмов стабилизации ошибки первого рода, обеспечивающих устойчивую работу на фоне нестационарного шума, среднее значение которого меняется в пределах «скользящего окна».

Методы исследования. Для решения перечисленных задач использовались аппарат математического анализа, теории оценивания и математической статистики, методы компьютерного моделирования и анализ экспериментальных данных.

Научная новизна работы.

1. Получены новые аналитические выражения плотности распределения вероятностей на выходе устройства обработки случайного процесса на входе

устройства стабилизации ошибки первого рода с двухэтапной процедурой сортировки и с последующим выбором порога по принципу «большого значения» или «меньшего значения». (Соответствует **п. 5 специальности 2.2.13 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**).

2. Получены новые аналитические выражения плотностей распределения вероятностей оценок коэффициентов полиномов в методе наименьших квадратов. (Соответствует **п. 5 специальности 2.2.13 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**).

3. Разработан алгоритм стабилизации ошибки первого рода при обнаружении сигнала на фоне нестационарного шума, среднее значение которого меняется в пределах «скользящего окна», в основе которого лежит линейная и квадратичная аппроксимация среднего значения с последующей компенсацией изменения среднего значения. (Соответствует **п. 5 специальности 2.2.13 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**. Соответствует **п.5 специальности 2.2.16 Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах**).

4. Разработан алгоритм стабилизации ошибки первого рода на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна». В его основе лежит критерий Манна–Уитни с последующим выбором модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего окна». (Соответствует **п.5 специальности 2.2.16 Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах**).

Научные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм обработки случайных сигналов на фоне нестационарного шума с адаптивным выбором модели изменения среднего значения шума обеспечивает выигрыш в отношении сигнал-шум до 5 дБ по сравнению с известным алгоритмом, основанным на вычислении дисперсии шума посредством усреднения элементов «скользящего окна» (Соответствует **п.5 специальности 2.2.13 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**).

2. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода с предварительной проверкой стационарности шума в пределах «скользящего окна» обеспечивает выигрыш в отношении сигнал-шум до 6 дБ по сравнению с алгоритмом, основанным на вычислении дисперсии шума посредством усреднения

элементов «скользящего окна» (*Соответствует п.5 специальности 2.2.13 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. Соответствует п.5 специальности 2.2.16 Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах*).

3. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода, основанный на двухэтапной процедуре сортировки элементов «скользящего окна» с последующим выбором в качестве оценки дисперсии шума «большого значения» или «меньшего значения» результатов второго этапа сортировки обеспечивает выигрыш в числе вычислительных операций от 6 до 22 раз при объёме $M=64$ и числе «подокон» $n=8$ и $n=16$ (*Соответствует п.5 специальности 2.2.16 Синтез и анализ алгоритмов обработки сигналов и информации в радиолокационных и радионавигационных системах и устройствах*).

Достоверность полученных результатов научных положений диссертационной работы, основных её результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, близостью результатов имитационного моделирования и теоретических расчётов, а также натурных и полунатурных экспериментов, сопоставлением полученных результатов с результатами независимых источников информации.

Для оценки эффективности предлагаемых алгоритмов стабилизации ошибки первого рода использовалось имитационное моделирование, анализ экспериментальных данных, а также сравнительный анализ с известными алгоритмами.

Практическая значимость.

1. Разработанные алгоритмы обеспечивают стабилизацию ошибки первого рода при обнаружении сигнала в условиях нестационарного шума, характерного для реальных радиотехнических систем.

2. На разработанные алгоритмы стабилизации ошибки первого рода получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Разработана методика исследования алгоритма, обеспечивающего постоянный уровень ложной тревоги на основе порядковых статистик при сегментации сортируемого массива, направленная на повышение вычислительной эффективности.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены:

1. В учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»: Исследование алгоритма ПС-ПУЛТ с сегментацией сортируемого массива: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: В.А. Белокуров, Ч.К. Нгуен. Рязань, 2025. 24 с.

2. В разработке компании АО «Разработка коммерческих и электронных технологий E-STARs».

Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Личное участие автора. Автору на правах соавтора принадлежат постановка задач, разработка способов и алгоритмов их решения, изложенных в главах диссертации, а также компьютерное моделирование работы алгоритмов и анализ экспериментальных данных. Степень авторства подтверждается соответствующим заключением кафедры РТС РГРТУ.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 Международных и 4 всероссийских научно-технических конференциях: 6-й, 7-й, Международные научно-технические форумы «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2023 и 2024 гг.); 26-я и 27-я Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2024 и 2025 гг.); 8-я Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2023 г.); 129-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» (Рязань, 2024 г.); 4-я Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов» (Москва, 2023 г.); 78-я Всероссийская конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (Москва, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 23 печатная научная работа, в том числе 8 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 8 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, реализующих предложенные алгоритмы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация содержит 132 страницы, в том числе 17 таблиц и 37 рисунков. Список использованной литературы содержит 102 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования, а также объект и предмет исследования. Подтверждена достоверность и раскрыта практическая значимость полученных результатов; приведены сведения об их реализации и внедрении. Отражён личный вклад автора, представлены данные об апробации работы и публикациях по теме исследования, а также дана характеристика структуры и объёма диссертации.

В первой главе рассмотрены подходы к снижению вычислительной сложности известного алгоритма постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик путём сегментации «скользящего окна» на «подокна» меньшего размера. Предложен и исследован модифицированный алгоритм «большее значение» при сегментации «скользящего окна» размером M на n «подокон» размером M/n элементов. Приведены аналитические выражения для расчёта вероятности ошибки первого рода.

Структурная схема предлагаемого модифицированного алгоритма «большее значение» при сегментации «скользящего окна» размером M на n «подокон» размером M/n элементов представлена на рисунке 1. В данном алгоритме сортировка элементов «скользящего окна» производится в два этапа. На первом этапе производится сортировка в n «подокнах» размером M/n элементов. На втором этапе – в двух «подокнах» размером $n/2$ каждая.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: u' – пороговый множитель обнаружения; M_Z – величина защитного интервала; z_l – достаточная статистика в l -м ячейке «скользящего окна»; Би – выбор «большого значения»; Ми – выбор «меньшего значения»; k_1 и k_2 – номера порядковых статистик «подокон», используемых на первом и втором этапе сортировки соответственно.

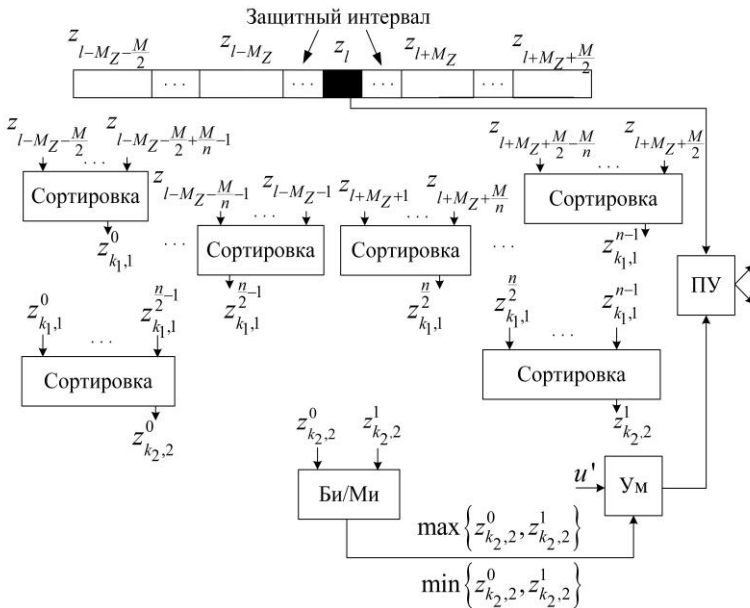


Рисунок 1 – Структурная схема предлагаемого модифицированного алгоритма «большее значение» при сегментации «скользящего окна» размером M на n «подокон» размером M/n

Отсчёты $z_{k_1,1}^0, \dots, z_{k_1,1}^{n-1}$ соответствуют k_1 -й порядковой статистике после первого этапа сортировки и отсчёты $z_{k_2,2}^0, z_{k_2,2}^1$ соответствуют k_2 -й порядковой статистке после второго этапа сортировки. Верхние индексы используются для обозначения номера блока. На первом этапе сортировки их значения принимают диапазон от 0 до $n-1$. Нижний индекс, расположенный вторым, определяет номер этапа сортировки. Оценка дисперсии шума $\hat{\sigma}_{ш}^2$

определяется на основе выбора «большого значения» или «меньшего значения» из двух элементов $z_{k_2,2}^0$ и $z_{k_2,2}^1$.

Обнаружение объекта в l -м канале обнаружения для предлагаемого алгоритма при выборе «большого значения» осуществляется согласно

$$z_l > \max \{ z_{k_2,2}^0, z_{k_2,2}^1 \} \cdot u', \quad (1)$$

при выборе «меньшего значения»:

$$z_l > \min \{ z_{k_2,2}^0, z_{k_2,2}^1 \} \cdot u'. \quad (2)$$

Аналитические выражения для вероятности ошибки первого рода в случае выбора «большого значения» $F^{Bu}(k_1, k_2)$ и в случае выбора «меньшего значения» $F^{Mu}(k_1, k_2)$ указаны в диссертации. Эти выражения не зависят от дисперсии шума.

Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значениях $n=8$ и $M=64$ показаны на рисунке 2, а, б.

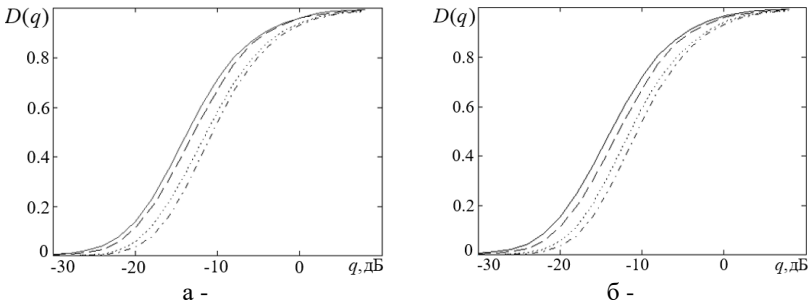


Рисунок 2 – Характеристики обнаружения при $M=64$, $n=8$:

а – выбор «большого значения»; б – выбор «меньшего значения»

На рисунке 2 сплошной линией представлены характеристики обнаружения известного алгоритма постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик при заданной вероятности ошибки первого рода $F_{\text{зад}}=10^{-3}$; прерывистой линией – характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при $F_{\text{зад}}=10^{-3}$; пунктирной линией – характеристики обнаружения известного алгоритма постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик при $F_{\text{зад}}=10^{-5}$; штрихпунктирной тонкой линией – характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значении $F_{\text{зад}}=10^{-5}$.

Анализ зависимостей на рисунке 2 показывает, что при вероятности правильного обнаружения $D=0,9$ разница порогового отношения сигнал-шум между предлагаемым алгоритмом и известным алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик без сегментации «скользящего окна» составляет от 0,3 до 1 дБ. При этом предлагаемый алгоритм обеспечивает преимущество по числу вычислительных операций по сравнению с известным алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых

статистик. В частности, при $M=64$ и $n=8$, 16 достигается выигрыш в диапазоне от 6 до 22 раз по среднему времени выполнения. Представленные в диссертации аналитические выражения для вероятности ошибки первого рода позволяют аналитически вычислить порог обнаружения при значениях M , n , k_1 и k_2 .

Во второй главе проведён анализ эффективности алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с построением «карты помех», алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с усреднением, алгоритма постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик и их вариаций в условиях шума, среднее значение которого изменяется в пределах «скользящего окна». Предложен и исследован алгоритм стабилизации ошибки первого рода на фоне нестационарного шума, среднее значение которого изменяется в пределах «скользящего окна».

Массив входных отсчётов \mathbf{z}_k k -го «скользящего окна» определяется следующим образом:

$$\mathbf{z}_k = \begin{cases} \{z_j\}_{j=k-0.5M}^{k-1-M_z} \cup \{z_j\}_{j=k+1+M_z}^{k+0.5M-1}, & \text{если } k = 0.5M \dots N-1-0.5M, \\ \{z_j\}_{j=k+1+M_z}^{k+M-M_z}, & \text{если } k < 0.5M, \\ \{z_j\}_{j=k-M+M_z}^{k-1-M_z}, & \text{если } k > N-1-0.5M, \end{cases} \quad (3)$$

где N – число импульсов в пакете; отсчёты массива $\{z_j\}_{j=0}^{N-1}$ являются

квадратами модулей выходных отсчётов двумерного дискретного преобразования Фурье и соответствуют каналам по дальности одного канала по скорости.

При вычислении параметров шума для каждого k -го канала обнаружения используется $M-2M_z$ отсчётов «скользящего окна». Отсчёт z_k не используется при вычислении параметров шума.

В рамках данной диссертационной работы вводятся предположения о линейном и квадратичном характере изменения среднего значения шума в пределах «скользящего окна»:

$$b_k^{LM}i + c_k^{LM}, \quad (4)$$

$$a_k^{KV}i^2 + b_k^{KV}i + c_k^{KV}, \quad (5)$$

где a_k^{KV} , b_k^{KV} , c_k^{KV} – параметры, описывающие изменение среднего значения шума при использовании квадратичной аппроксимации; b_k^{LM} , c_k^{LM} – параметры, описывающие изменение среднего значения шума при использовании линейной аппроксимации; $i = 0, 1 \dots M$. Коэффициенты a_k^{KV} , b_k^{KV} , c_k^{KV} , b_k^{LM} , c_k^{LM} вычисляются на основе метода наименьших квадратов и отсчётов массива \mathbf{z}_k .



Рисунок 3 – Структурная схема предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода на фоне нестационарного шума

Структурная схема предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода обнаружения объекта при условии, что среднее значение шума в пределах каждого «скользящего окна» может меняться по линейному закону показана на рисунке 3. На этом рисунке введено следующее обозначение: u^{LM} – порог обнаружения; \hat{z}_k – отчёт в k -м канале на выходе блока вычитания.

Принцип работы алгоритма следующий: входные отсчёты «скользящего окна» z_k подаются одновременно в блок оценки тренда и блок вычитания. В блоке оценки тренда осуществляется оценка коэффициентов линейного полинома \hat{b}_k^{LM} и \hat{c}_k^{LM} методом наименьших квадратов, а в блоке вычитания производится вычитание линейного тренда из входных отсчётов «скользящего окна». Далее, в блоке вычисления определяются оценки математического ожидания $m_{\hat{z}_k}^{LM}$ и дисперсии $\sigma_{\hat{z}_k}^{1^2}$ входных отсчётов за исключением отсчётов, входящих в «защитный» интервал. В блоке нормировки вычисляется нормированная случайная величина $\hat{z}_k^{LM-norm}$, которая сравнивается с порогом u^{LM} в пороговом устройстве ПУ для обнаружения объекта в k -м канале.

Для предлагаемого алгоритма проводится анализ зависимости вероятности ошибки первого рода F от размера «скользящего окна» и от изменения дисперсии шума. Результаты моделирования показывают, что при увеличении размера окна M вероятность ошибки первого рода F стремится к заданному значению. Предлагаемый алгоритм обеспечивает стабилизацию вероятности ошибки первого рода F при изменении дисперсии шума в широком диапазоне.

На рисунке 4, а, б представлены характеристики обнаружения для предлагаемого алгоритма при значениях $F_{зад}=10^{-7}$ и $F_{зад}=10^{-8}$. Зависимости получены методом имитационного моделирования. Число проведённых испытаний составило $10/F_{зад}$.

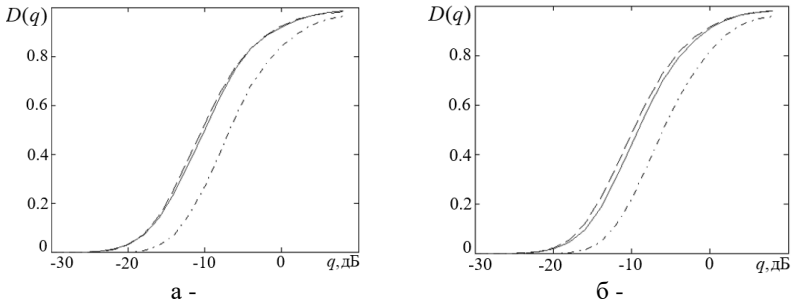


Рисунок 4 – Характеристики обнаружения при значении

$b_k^{LM} = 3,8$ и $c_k^{LM} = 4,0$: а – $F_{зад} = 10^{-7}$; б – $F_{зад} = 10^{-8}$

Сплошная линия соответствует характеристикам обнаружения для предлагаемого алгоритма на фоне нестационарного шума; штрихпунктирная линия – известному алгоритму постоянного уровня ложной тревоги с усреднением на фоне нестационарного шума; пунктирная линия – известному алгоритму постоянного уровня ложной тревоги с усреднением на фоне стационарного шума.

В таблице 1 представлена разность в пороговом отношении сигнал-шум между предлагаемым алгоритмом и известным алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением. Положительные значения указывают на выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, а отрицательные – на его снижение по сравнению с известным алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением в условиях стационарного шума.

Таблица 1 – Выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, дБ

Параметры		Заданная вероятность ошибки первого рода, $F_{зад}$		
		10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
b_k^{LM}	c_k^{LM}			
0	0	-0,2	-0,3	-0,4
1,0	1,2	1,2	1,3	1,5
1,5	1,3	1,3	1,5	1,7
2,0	1,8	1,6	1,7	2,0
3,5	4,5	2,7	2,8	3,0
5,0	4,2	3,5	3,5	3,6

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4, а также данных, приведённых в таблице 1, показывает, что при $D=0,9$ в предлагаемом алгоритме пороговое отношение сигнал-шум оказывается меньше, чем в известном алгоритме постоянного уровня ложной тревоги с усреднением при работе в условиях нестационарного шума. В частности, при значениях $F_{зад} = 10^{-8}$, $b_k^{LM} = 5,0$ и $c_k^{LM} = 4,2$ эта величина составляет

до 3,6 дБ. Кроме того, на фоне стационарного шума ($b_k^{LM} = 0$ и $c_k^{LM} = 0$) в предлагаемом алгоритме пороговое отношение сигнал-шум выше на 0,4 дБ, чем в известном алгоритме постоянного уровня ложной тревоги с усреднением при $F_{зад} = 10^{-8}$.

В данной диссертационной работе также проводится сравнение числа машинных циклов между предлагаемым и известными алгоритмами. Результаты анализа показывают, что в условиях нестационарного шума время выполнения вычислительных операций предлагаемого алгоритма меньше, чем

у алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с усреднением. При $M=128$ выигрыш по числу машинных циклов в наилучшем случае достигает 1,2 раза.

В третьей главе представлено исследование эффективности алгоритма стабилизации ошибки первого рода в условиях нестационарного шума. В основе предлагаемого алгоритма лежит выбор линейной или квадратичной модели аппроксимации среднего значения шума на основании сравнения соответствующих дисперсий. Также предложен алгоритм стабилизации ошибки первого рода, в котором для проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна» используется статистический критерий Манна – Уитни.

Упрощённая структурная схема предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода с адаптивным выбором модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего окна» показана на рисунке 5.

На схеме представлены следующие обозначения: ПУ1 и ПУ2 – пороговые устройства; u^{LM} и u^{KV} – пороги обнаружения, соответствующие линейной и квадратичной аппроксимации среднего значения шума; $\sigma_{\hat{z}_k}^{1LM}$ и $m_{\hat{z}_k}^{1LM}$ – дисперсия и математическое ожидание на выходе блока вычисления для линейной аппроксимации; $\sigma_{\hat{z}_k}^{2LM}$ и $m_{\hat{z}_k}^{2LM}$ – дисперсия и математическое ожидание на выходе блока вычисления для квадратичной аппроксимации; \hat{z}_k^{LM} и \hat{z}_k^{KV} – отчёты в k -м канале на выходе блока вычитания для линейной и квадратичной аппроксимации соответственно.

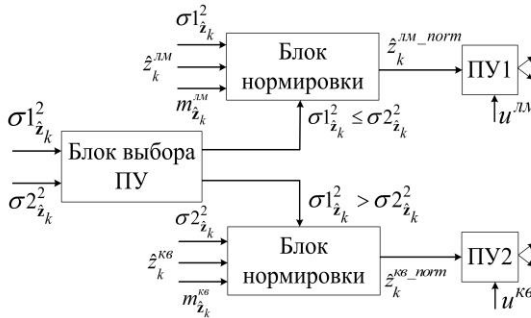


Рисунок 5 – Упрощённая структурная схема предлагаемого алгоритма с адаптивным выбором модели аппроксимации среднего значения шума

В предлагаемом алгоритме принцип определения параметров для случая квадратичной аппроксимации формулируется аналогично линейной аппроксимации, рассмотренной в предыдущем алгоритме. Блок выбора ПУ в схеме реализует выбор порогового устройства ПУ1 для линейной аппроксимации или ПУ2 для квадратичной аппроксимации на основе сравнения дисперсий $\sigma_{\hat{z}_k}^{1LM}$ и $\sigma_{\hat{z}_k}^{2LM}$.

Обнаружение объекта в k -м канале обнаружения осуществляется в соответствии с выражениями:

$$\hat{z}_k^{LM-norm} > u^{LM} \text{ в случае } \sigma_{\hat{z}_k}^2 \leq \sigma_{\hat{z}_k}^2, \quad (6)$$

$$\hat{z}_k^{KV-norm} > u^{KV} \text{ в случае } \sigma_{\hat{z}_k}^2 > \sigma_{\hat{z}_k}^2, \quad (7)$$

где $\hat{z}_k^{LM-norm}$ и $\hat{z}_k^{KV-norm}$ – нормированные случайные величины на входе порогового устройства для линейной и квадратной аппроксимации соответственно.

Результаты моделирования показывают, что для предлагаемого алгоритма при увеличении значения M вероятность ошибки первого рода F стремится к $F_{зад}$ и остаётся неизменной при изменении дисперсии шума $\sigma_{ш}^2$ в широком диапазоне.

На рисунке 6 показаны характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма с адаптивным выбором модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего окна». Характеристики обнаружения построены при $M=128$ и $F_{зад}=10^{-7}$, $F_{зад}=10^{-8}$. Сплошная линия соответствует характеристикам обнаружения предлагаемого алгоритма в условиях нестационарного шума, а пунктирная линия – известному алгоритму постоянного уровня ложной тревоги с усреднением.

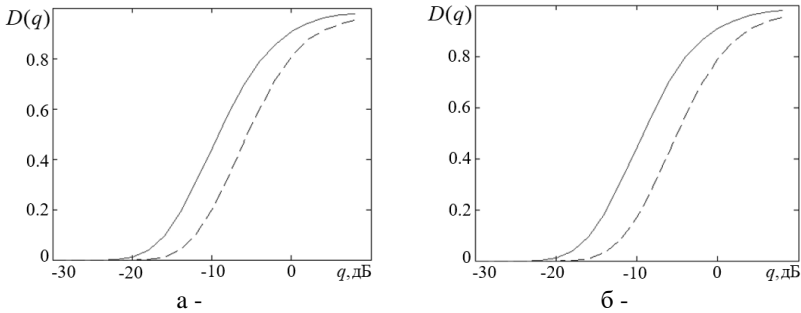


Рисунок 6 – Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значениях $a_k^{KV}=0,25$; $b_k^{KV}=1,8$ и $c_k^{KV}=2,5$ на фоне нестационарного шума:

а – $F_{зад}=10^{-7}$; б – $F_{зад}=10^{-8}$

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 6, показывает, что при значениях $D=0,9$ и $F_{зад}=10^{-7}$ выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум по сравнению с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением составляет примерно 5,1 дБ, а при $F_{зад}=10^{-8}$ это значение составляет 5,2 дБ.

В данной диссертационной работе эффективность предлагаемого алгоритма также оценивается на основе анализа экспериментальных данных, полученных с использованием РЛС AWR1642 при выполнении сканирования в условиях отсутствия объекта.

Таблица 2 – Вероятность ошибки первого рода при использовании экспериментальных данных

Объем выборки, M	32	36	40	48
Вероятность ошибки первого рода, F	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$

В таблице 2 приведены значения вероятности ошибки первого рода для различных размеров «скользящего окна» M при заданной величине $F_{\text{зад}} = 10^{-3}$.

Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать вывод, что для предлагаемого алгоритма при увеличении объёма выборки M вероятность ошибки первого рода F стремится к заданной величине $F_{\text{зад}}$.

В данной работе также предлагается алгоритм стабилизации ошибки первого рода на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна», а его структурная схема показана на рисунке 7. На этой схеме введены обозначения: УС-ПУЛТ – алгоритм постоянного уровня ложной тревоги с усреднением; u^{yc} – порог обнаружения; $\hat{x}_k^{yc_ПУЛТ}$, $\hat{x}_k^{лм_norm}$, $\hat{x}_k^{кв_norm}$ – значения решающих статистик в k -м канале обнаружения. Размер массива \mathbf{x}_k равен M . В данный массив входят элементы массива \mathbf{z}_k , а также отсчёты, попадающие в защитный интервал, и отсчёт, который сравнивается с порогом обнаружения.

Отсчёты массива \mathbf{z}_k поступают в блок оценки стационарности, на этом этапе осуществляется проверка однородности выборки с использованием непараметрического критерия Манна – Уитни.

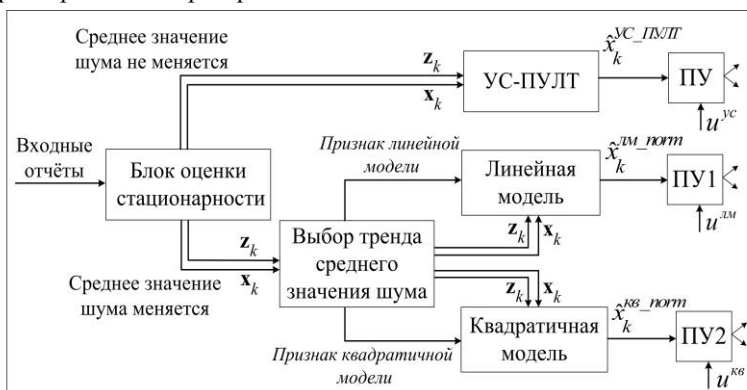


Рисунок 7 – Структурная схема предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода на основе проверки стационарности шума

Если значение статистики превышает критический порог, делается вывод о нестационарном характере шума. В противном случае считается, что шум является стационарным, и дальнейшая обработка осуществляется с использованием алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с усреднением. При выявлении нестационарности шума в k -м «скользящем окне», отсчёты \mathbf{z}_k направляются в блок выбора тренда среднего значения шума. В данном блоке осуществляется определение закона аппроксимации, описывающего изменение среднего значения шума, на основе предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода с адаптивным выбором модели аппроксимации среднего уровня шума, представленного выше.

На рисунке 8, а, б показаны характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма стабилизации ошибки первого рода на основе проверки стационарности шума.

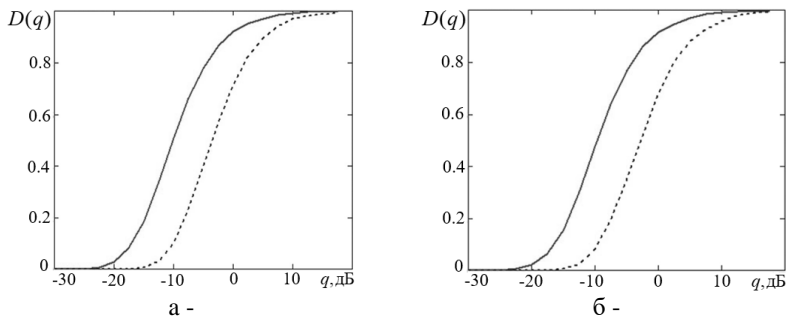


Рисунок 8 – Характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма при значении $a_k^{кв} = 0,15$, $b_k^{кв} = 2$ и $c_k^{кв} = 3$: а – $F_{зад}=10^{-7}$; б – $F_{зад}=10^{-8}$

Сплошная линия соответствует характеристикам обнаружения предлагаемого алгоритма; пунктирная линия – известному алгоритму постоянного уровня ложной тревоги с усреднением. Заданные вероятности ошибки первого рода равны $F_{зад}=10^{-7}$ и $F_{зад}=10^{-8}$. Вероятность правильного обнаружения $D=0,9$. Согласно результатам, представленным на рисунке 8, в условиях нестационарного шума предлагаемый алгоритм демонстрирует преимущество по пороговому отношению сигнал-шум, достигающее 5,7 дБ при $F_{зад}=10^{-7}$, по сравнению с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением. При значении $F_{зад}=10^{-8}$ данный алгоритм обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, составляющий 5,8 дБ.

В таблице 3 также приведён выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум предлагаемого алгоритма по сравнению с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением для различных параметров $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$ и $c_k^{кв}$ в случаях $F_{зад}=10^{-7}$, $F_{зад}=10^{-8}$ при $D=0,9$.

Таблица 3 – Выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум, дБ

Параметры			Заданная вероятность ошибки первого рода	
$a_k^{кв}$	$b_k^{кв}$	$c_k^{кв}$	$F_{зад}=10^{-7}$	$F_{зад}=10^{-8}$
0	0	0	0	0
0	2	3	2,3	2,5
0	4	5	3,1	3,3
0,1	2	1	4,0	4,2
0,2	1	2	5,9	6,1

Как следует из анализа данных таблицы 3, увеличение значений параметров $a_k^{кв}$, $b_k^{кв}$ и $c_k^{кв}$ приводит к возрастанию выигрыша в пороговом отношении сигнал-шум, достигающего 6,1 дБ при параметрах $a_k^{кв} = 0,2$, $b_k^{кв} = 1$ и $c_k^{кв} = 2$. В стационарном случае (при значениях $a_k^{кв} = 0$, $b_k^{кв} = 0$ и $c_k^{кв} = 0$) эффективность предлагаемого алгоритма оказывается сопоставимой с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением, что обусловлено использованием блока оценки стационарности.

Оценка эффективности предлагаемого алгоритма на основе проверки стационарности шума также проводится на основании анализа экспериментальных данных, зафиксированных РЛС AWR1642. Результаты анализа экспериментальных данных показывают, что для предлагаемого алгоритма при увеличении дальности действия РЛС наблюдается снижение вероятности правильного обнаружения, а при увеличении размера выборки M величина вероятности ошибки первого рода F в каналах обнаружения стремится к заданному значению $F_{\text{зад}}$.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Получено аналитическое выражение вероятности ошибки первого рода для алгоритма постоянного уровня ложной тревоги на основе порядковых статистик при сегментации «скользящего окна», в котором сортировка элементов «скользящего окна» осуществляется в два этапа.

2. Модифицированный алгоритм «большее значение» при сегментации «скользящего окна» размером M на n «подокон» и двухэтапной сортировки обеспечивает выигрыш в числе вычислительных операций от 6 до 22 раз по сравнению с известной процедурой расчёта порогового значения при незначительном (от 0,3 дБ до 1,0 дБ) увеличении отношения сигнал-шум.

3. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 3 дБ при значении $F_{\text{зад}}=10^{-8}$ по сравнению с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги, который основан на вычислении дисперсии шума путем усреднения элементов «скользящего окна». При обнаружении объекта на фоне стационарного шума, разность в пороговом отношении сигнал-шум не превышает 0,4 дБ при значении $F_{\text{зад}}=10^{-8}$.

4. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода с адаптивным выбором модели аппроксимации среднего значения шума в пределах «скользящего окна» обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 5 дБ при значении $F_{\text{зад}}=10^{-8}$ по сравнению с алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги, основанным на вычислении дисперсии шума путем усреднения элементов «скользящего окна».

5. Алгоритм стабилизации ошибки первого рода на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна» обеспечивает выигрыш в пороговом отношении сигнал-шум до 6 дБ при значении $F_{\text{зад}}=10^{-8}$ по сравнению с известным алгоритмом постоянного уровня ложной тревоги с усреднением в условиях нестационарного шума, при этом его эффективность в стационарных условиях практически совпадает с эффективностью алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с усреднением.

6. Результаты анализа экспериментальных данных показывают, что предлагаемые алгоритмы обеспечивают стабилизацию ошибки первого рода на фоне нестационарного шума. Вероятность ошибки первого рода F стремится к заданному уровню с увеличением размера «скользящего окна» M , тогда как вероятность правильного обнаружения снижается с увеличением дальности действия обнаружителя. В условиях стационарного шума эффективность предлагаемого алгоритма, основанного на проверке стационарности шума в

пределах «скользящего окна», практически совпадает с эффективностью алгоритма постоянного уровня ложной тревоги с усреднением.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Нгуен Ч.К. Расчёт параметров схемы стабилизации вероятности ложной тревоги обнаружителя случайных сигналов / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – № 1. – С. 27-31.

2. Нгуен Ч.К. Исследование алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги на основе порядковой статистики при сегментации сортируемого массива / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств». – 2023. – № 2. – С. 48-51.

3. Нгуен Ч.К. Расчёт параметров схемы стабилизации уровня ложной тревоги на основе порядковой статистики / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 11-21.

4. Нгуен Ч.К. Расчет плотности распределения вероятностей оценок коэффициентов полинома в методе наименьших квадратов / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2024. – № 89. – С. 12-20.

5. Нгуен Ч.К. Исследование эффективности алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги на фоне нестационарного шума / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств». – 2024. – № 2. – С. 40-44.

6. Нгуен Ч.К. Исследование эффективности адаптивного алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги на фоне шума с нестационарным средним значением / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Всероссийский научно-технический журнал «Проектирование и технология электронных средств». – 2025. – № 1. – С. 35-42.

7. Нгуен Ч.К. Алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги на фоне шума с нестационарным средним значением / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 77-87.

8. Нгуен Ч.К. Адаптивный алгоритм стабилизации уровня ложной тревоги на основе проверки стационарности шума в пределах «скользящего окна» / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Цифровая обработка сигналов. – 2025. – № 2. – С. 9-14.

Публикации в других изданиях

9. Нгуен Ч.К. Исследование законов распределения отражённых от морской поверхности радиотехнических сигналов / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Сборник трудов 4-й Всероссийской конференции «Современные технологии обработки сигналов». – Москва. – 2023. – С. 15-18.

10. Нгуен Ч.К. Уменьшение вычислительных затрат в алгоритме стабилизации уровня ложной тревоги на основе порядковой статистики / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Сборник трудов 78-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий». – Москва. – 2023. – С. 69-72.

11. Нгуен Ч.К. Анализ алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги с нормировкой / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023: сборник трудов VI Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2023. Т. 1. С. 42-47.

12. Нгуен Ч.К. Аппроксимация закона определения отсчётов на входе порогового устройства / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань: РГРТУ, 2024. Т. 1. С. 63-67.

13. Нгуен Ч.К. Исследование влияния нестационарного шума на эффективность стабилизации уровня ложной тревоги / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Сборник трудов XXVI Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2024». – Москва. – 2024. – С. 99-102.

14. Нгуен Ч.К. Алгоритм выбора модели тренда шума в блоке стабилизации уровня ложной тревоги / Ч.К. Нгуен // Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». – Рязань. – 2024. – С. 153-154.

15. Нгуен Ч.К. Исследование эффективности алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги с выбором модели аппроксимации среднего значения шума / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Сборник трудов XXVII Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение DSPA-2025». – Москва. – 2025. – С. 89-94.

16. Нгуен Ч.К. Статистический анализ распределения отражений от морской поверхности / Ч.К. Нгуен, В.А. Белокуров // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань. – 2023. – С. 55-60.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

17. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для исследования эффективности алгоритма стабилизации уровня ложных тревог на основе использования логического критерия “большее из”: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023666415. – Зарегистр. 24.07.2023; опублик. 31.07.2023. – 571 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

18. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для исследования параметров схемы стабилизации вероятности ложной тревоги при сегментации сортируемого массива: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2023666473. – Зарегистр. 24.07.2023; опублик. 01.08.2023. – 317 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

19. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для исследования законов распределения отражённых от морской поверхности радиотехнических сигналов по критерию согласия “хи-квадрат”: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024611287. – Зарегистр. 27.12.2023; опублик. 18.01.2024. – 6 кБ. – Яз. программирования: MATLAB R2014a. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

20. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для расчета плотности распределения вероятностей оценок коэффициентов полинома методом наименьших квадратов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024666888. – Зарегистр. 15.07.2024; опублик. 17.07.2024. – 694 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

21. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для расчета эффективности алгоритма стабилизации уровня ложных тревог с оценкой параметров шума: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2024666944. – Зарегистр. 15.07.2024; опубл. 18.07.2024. – 561 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

22. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа выбора модели тренда шума для алгоритма стабилизации уровня ложной тревоги на фоне шума с нестационарным средним значением: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025662623. – Зарегистр. 06.05.2025; опубл. 22.05.2025. – 792 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

23. Нгуен Ч.К., Белокуров В.А. Программа для расчёта эффективности алгоритма стабилизации уровня ложных тревог с применением критерия проверки стационарности шума: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025663332. – Зарегистр. 27.05.2025; опубл. 18.06.2025. – 1094 кБ. – Яз. программирования: Mathcad 15. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

НГУЕН Чонг Куанг

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ШУМОВ С ПОСТОЯННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ ОШИБКИ ПЕРВОГО РОДА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____. _____. 202__. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.