

О Т З Ы В

официального оппонента – доктора технических наук профессора
Кострова Виктора Васильевича

на диссертацию **Кузьмина Евгения Всеволодовича** «Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приёме на фоне внешних помех», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Актуальность темы

Современные радиотехнические системы функционируют в сложной электромагнитной обстановке. Источниками внешних помех являются другие радиостанции, мощные промышленные установки, специальные постановщики активных помех. Подавление внешних помех в радионавигационных системах – это комплексная задача, от решения которой зависят безопасность, точность и надежность. Навигационные системы космического базирования (GPS/ГЛОНАСС, Галилео, Бэйдоу и др.) работают с чрезвычайно слабыми сигналами, приходящими от спутников, поэтому они особенно уязвимы. Необходимость борьбы с помехами в радионавигационных системах вытекает из фундаментальных принципов радиотехники и экономических требований. Ее можно разделить на несколько ключевых аспектов. К ним относятся сохранение целостности информации, эффективное использование частотного спектра, обеспечение чувствительности и динамического диапазона, энергетическая и экономическая эффективность, надежность и предсказуемость работы системы.

Система, подверженная влиянию внешних помех, работает нестабильно. Ее основные характеристики (дальность действия, качество определения местоположения, скорость передачи данных) начинают зависеть от непредсказуемых внешних факторов. Для критически важных систем радионавигации такая неопределенность недопустима. Борьба с помехами — это путь к созданию надежных и предсказуемых устройств. Необходимость борьбы с внешними помехами является не просто задачей технического усовершенствования аппаратуры, а фундаментальным требованием для создания любых эффективных, надежных и экономичных радиотехнических систем. Без этой борьбы становится невозможным выполнение основной задачи радионавигации – достоверного определения своего местоположения.

Методы подавления помех можно разделить на несколько ключевых категорий, от аппаратных до алгоритмических.

1. Пространственные методы
2. Частотные методы
3. Метод компенсации (вычитания) помехи из принятого сигнала
4. Временные и корреляционные методы с использованием методов расширения спектров
5. Комбинация практически всех перечисленных методов (каскадная защита)

Применительно к радионавигационным системам автор рассматривает наиболее сложный случай приема и обработки сигналов в устройствах с одним входом (с одной антенной), что предполагает работу только с временными реализациями сигналов. В таких устройствах отсутствует возможность использования пространственных различий сигналов и помех, формирования специальной диаграммы направленности антенны. Для подавления помех остается доступной временная выборка наблюдений, которая может быть как классифицированной, так и неклассифицированной. Все это существенно усложняет задачу проектирования систем обработки радионавигационных сигналов,

Отдел корреспонденции
и контроля исполнения
документов МАИ

«24» 11 2025 г.

делает входящие в них радиоустройства взаимосвязанными, поэтому необходимо всестороннее исследование возникающих проблем.

К основным проблемам можно отнести повышение помехоустойчивости приема сложных спектрально-эффективных сигналов на фоне структурно-подобных помех, повышение устойчивости алгоритмов подавления помех в условиях неопределенности присутствия сигналов в доступной временной выборке. Следует заметить, что в системах поиска сложных сигналов и синхронизации приемников радионавигационных сигналов, не смотря на интенсивные исследования последних десятилетий, также много проблемных вопросов, особенно связанных с воздействием на них помех. Даже в простом случае воздействия гармонической помехи процессы поиска и приема широкополосных шумоподобных сигналов (ШПС) изучены недостаточно, не говоря уже о более сложном случае присутствия комплекса разнообразных помех.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная научно-техническая проблема – повышение эффективности радиоэлектронных систем извлечения информации при наличии исключительно временной выборки сигналов и помех, а также обеспечение возможности реконфигурации алгоритмов их обработки.

Диссертация Е.В. Кузьмина посвящена решению данной проблемы за счет расширенного исследования эффективности весовых оконных функций в задачах спектральной обработки сложных сигналов, а также их практического использования в радионавигационных системах с целью повышения качества работы устройств поиска ШПС в условия воздействия гармонических и многокомпонентных помех. В связи с указанным актуальность исследований, результаты которых представлены в диссертации, не вызывает сомнений.

Достоверность и новизна основных выводов и результатов диссертации

Целью диссертационной работы автор считает «исследование и реализацию алгоритмических резервов повышения эффективности подавления внешних помех для совершенствования РЭС, функционирующих при одноканальном ненаправленном приёме ШПС» (с. бар – автореферата, с. 16д – диссертации).

Для достижения сформулированной цели автор решил широкий круг задач с использованием разнообразных методов и подходов. В частности, цель диссертации достигалась:

1. Широким использованием преобразования Фурье для решения задачи корреляционной обработки, поиска и синхронизации широкополосных сигналов (ШПС) с малой энергетикой (все разделы).
2. Разработкой алгоритмов режекции и компенсации узкополосных помех при обработке классифицированной и неклассифицированной выборки наблюдаемого процесса (раздел 4, 5).
3. Развитием методов приема спектрально-весаого оценивания параметров помех и использования этих оценок при компенсации и режекции гармонических помех (раздел 4).
4. Модернизацией нерекурсивного алгоритма подавления помех при решении задачи поиска ШПС в классифицированной и неклассифицированной выборке (раздел 5).
5. Проведением синтеза и детального анализа свойств предлагаемых структур сигналов (раздел 1).
6. Исследованием вероятностных характеристик предложенных алгоритмов поиска ШПС (раздел 3), качества подавления помех (раздел 4) при наличии узкополосных помех и шума.

7. Разработкой и детальным исследованием ШПС, у которых каждый чип (элемент код) взвешивается атомарными и другими весовыми функциями. (раздел 1,4,5).

8. Имитационным моделированием (раздел 4); экспериментальной проверкой с помощью полунатурного моделирования процедур поиска ШПС и спектрально-весовой компенсации узкополосных помех на базе Фурье фильтрации; реализацией постобработки на персональном компьютере, встроенном в экспериментальную установку (раздел 6).

В диссертации показано, что использование выборочной корреляционной матрицы при помехоподавлении обеспечивает заметный выигрыш (до 5...20 дБ) в допустимом отношении помеха-сигнал, при котором процедура поиска сохраняет работоспособность. По сравнению с известными алгоритмами использование предлагаемых алгоритмов подавления помех обеспечивает повышение устойчивости функционирования радионавигационных систем, более высокую вероятность правильного поиска широкополосного сигнала.

К числу интересных результатов работы, на мой взгляд, можно отнести следующее.

1. Предложен новый сигнал с фазовой манипуляцией ФМ-ур-ШПС с более компактным спектром, чем классические ФКМ сигналы, и в отличие от ВОС-ШПС – с монопиковым главным лепестком. Для снижения глубины амплитудной модуляции ФМ-ур-ШПС предлагается квадратурная компоновка из 2-х сигналов с различными ПСП и квадратурными несущими колебаниями. Это существенно повышает энергетику радиопередатчика. Такие сигналы обладают большим потенциалом в части борьбы с рядом помех (п.1.2.3, с.46-60).

2. Проведен анализ влияния разрядности квантования на вероятность правильного поиска (п.3.2.2, с.152-156). Для рассматриваемой задачи показано, что потери от бинарного квантования не превышают 2 дБ, а при разрядности АЦП более 4-х потери практически отсутствуют. Аналогичные исследования проведены для случая воздействия помех. Наличие помех накладывает на АЦП более жесткие требования, требуется разрядность не менее 10...12 бит.

3. Представляет интерес исследование влияния многочастотных помех на качество обработки ШПС сигналов. Показана эволюция плотности распределения помех в зависимости от количества гармоник и распределения фазы (п.3.3, с.175-184). Показана нормализация гистограмм при большом количестве помех со случайными параметрами.

Таким образом, в диссертации разработана методологическая база организации поиска и обработки сложных сигналов в условиях воздействия гармонических и структурно-подобных помех.

Указанное и составляет новые научные и практические результаты. Основные положения, выносимые на защиту, подтверждены расчетами и анализом с использованием методов математической статистики и теории статистических решений, теории спектрального оценивания параметров сигналов и помех, методов адаптивной фильтрации, теории матриц.

Обоснованность и достоверность научных положений

Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов, достоверность основных результатов, полученных в диссертации, определяется: использованием методов математического анализа, включая интегральное исчисление, линейной алгебры и матричного анализа при решении задач синтеза и оценки качества предлагаемых алгоритмов обработки сложных широкополосных сигналов; применением

теории и методов спектрального оценивания, включая преобразование Фурье; сходимостью результатов в частных случаях с известными результатами, проверенными временем; подтверждается математическим, статистическим и полунатурным моделированием.

Ценность для науки

Новые научно-технические результаты, полученные в диссертации и представляющие ценность для науки, состоят в следующем:

1. Получила дальнейшее развитие теория приема сложных сигналов при использовании ненаправленных антенн и обработки на основе выборочных корреляционных матриц. Разработана научно обоснованная методология повышения качества процедуры поиска ШПС с подавлением помех при неклассифицированной выборке наблюдений, позволяющая повысить помехоустойчивость приема в различных тактических ситуациях.
2. Проведено исследование качества алгоритма подавления помех, основанного на выборочной корреляционной матрице. Достигнутый при одноканальном приеме и неклассифицированной выборке коэффициент подавления составил 20...40 дБ, что хорошо согласуется с известными результатами.
3. Автором предложен оригинальный подход к исследованию результата воздействия помехи как к вопросу о частотной характеристике коррелятора (раздел 2).
4. Получила дальнейшее развитие теория формирования приема сигналов с фазовой манипуляцией и специальной модуляцией элементов кода, которые обеспечивают эффективное использование частотного ресурса.
5. Проведено исследование характеристик беспорогового поиска ШПС по задержке при воздействии многочастотных, узкополосных и структурно-подобных помех, когда производится предварительное взвешивание наблюдаемого сигнала различными весовыми функциями.
6. Результаты по исследованию метода повышения устойчивости работы и эффективности алгоритмов обработки сигналов при наличии неклассифицированной выборки, которые учитывают неопределенность присутствия помехи.

Постановка задачи исследования повышения помехоустойчивости систем, систем поиска сигналов требует глубоких знаний и проведения тонких вычислительных экспериментов. Основные теоретические результаты, полученные и сформулированные в диссертации, свидетельствуют о том, что автор достаточно хорошо владеет математическим аппаратом и аппаратом статистической радиотехники, глубоко разбирается в проблемах радионавигационных систем.

Практическая ценность

Практическую ценность представляют следующие результаты диссертации:

1. Полученные соотношения для оценки влияния гармонических помех на корреляционную обработку могут быть использованы в радиолокационных и связных системах, гидроакустических комплексах, системах передачи данных и т.п.
2. Новые данные по свойствам оконных функций в приложении к задачам режекции помех, а также к задачам спектрально-весового оценивания параметров помех для их компенсации востребованы практикой и помогают выбирать весовую функцию на ранних стадиях проектирования РТС.

3. В рассмотренных алгоритмах широко применяется преобразование Фурье, которое в быстром вычислительном варианте (БПФ) предоставляет эффективную реализацию алгоритмов в удобной для практического использования форме.

4. Разработаны предложения по формированию ансамблей шумоподобных сигналов с модулированными атомарными функциями элементами кода, что повышает их спектральную эффективность и обеспечивает системе электромагнитную совместимость с другими средствами.

5. Результаты исследования режекции помех с применением преобразования Фурье и взвешивания с использованием классических и современных оконных функций показали дополнительные резервы практического повышения эффективности.

6. Разработаны важные для практического использования квазиоптимальные алгоритмы поиска ШПС, которые используются в радионавигационных системах, в условиях воздействия узкополосных помех.

Результаты диссертационного исследования являются универсальными, дают методологическую основу разработки радиотехнических систем в различных тактических ситуациях.

Структура и основное содержание диссертации

Диссертация содержит 458 страниц и состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованной литературы и шести приложений. Общий объем работы составляет 376 страниц основного текста, включая 187 рисунков, 25 таблиц, библиографию из 275 наименований, в том числе 44 работы автора, из которых 40 относится к числу основных и отражающих существо диссертации. Приложения к диссертации размещены на 41 странице.

В диссертации Е.В. Кузьмина рассматривается широкий круг вопросов статистической обработки фазоманипулированных навигационных радиосигналов (поиск по времени задержки широкополосных сигналов, подавление гармонических и многотональных помех) при использовании моделей сигналов с спектрально-эффективной модуляцией и помех, что придает дополнительную ценность результатам работы. Материалы отдельных разделов диссертации тесно связаны между собой и объединены общей постановкой задачи, используемыми моделями сигналов и помех, а также подходами и методами исследования. Особое внимание в диссертации уделено вопросам и задачам повышения помехоустойчивости приема в присутствии гармонических и структурно-подобных помех, широкополосного шума и шума квантования.

Основное содержание диссертации составляют следующие направления работ. В первой главе детально рассматриваются широкополосные сигналы (ШПС), которые используются в современных и перспективных радионавигационных системах. Показана необходимость исследования влияния внешних узкополосных и структурно-подобных помех. Во второй главе проводится анализ алгоритмов корреляционной обработки ШПС на основе преобразования Фурье при синфазной и квадратурной обработке, а также при воздействии узкополосных помех. В третьей главе проводится статистическое исследование процедуры поиска ШПС по задержке при наличии узкополосной и многочастотной помех. В четвертой главе исследуются алгоритмы частотной режекции помехи с весовым взвешиванием. Рассмотрена работа адаптивного компенсатора помех с предварительным оцениванием параметров помех. Для 27 весовых функций проведен расчет коэффициентов прохождения сигнала и подпомеховой видимости. Пятая глава посвящена исследованию статистических характеристик процессов поиска ШПС по задержке, в основе которой лежит модернизированный нерекурсивный алгоритм. В

шестой главе приводится описание имитатора для полунатурного моделирования и изложение результатов экспериментальных исследований.

В заключении, состоящем из 6 развернутых пунктов, подробно перечислены основные достигнутые в диссертации научные и практические результаты. Приложения содержат вспомогательные материалы (дополнительные пояснения к главам в виде осциллограмм, вывода уравнений, графиков и т.п.) и акты использования результатов диссертационной работы в промышленности и в учебном процессе.

Диссертационная работа Е.В. Кузьмина изложена на высоком научно-техническом уровне, написана четким, технически грамотным языком и качественно оформлена. Вместе с тем автору диссертации не удалось избежать ряда технических и стилистических погрешностей.

Критические замечания

1. В большинстве случаев отсутствует сравнение полученных результатов по подавлению помех с теорией, поскольку для обработки в основном используются линейные методы, а в условиях воздействия негауссовских помех это квазиоптимальные методы (раздел 3, 4). Отсутствует сравнение качества работы алгоритмов режекции и компенсации, которые рассматриваются в рамках одного раздела (раздел 4).

2. Ушел на второй план вопрос об искажениях сигналов при использовании компенсаторов или устройств режекции помех, их влияния на системные навигационные характеристики, такие как точность определения местоположения объектов (с.225-230д).

3. При расчете «показателей качества подавления помех» (с. 225д, 300д) не учитывался динамический диапазон радиоприемного устройства.

4. Вопрос использования весовой атомарной функции (разделы 1, 4) является весьма спорным, как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения практического использования. Атомарные функции чувствительны к точности воспроизведения (квантованию, амплитудно-фазовым искажениям передатчика и т.п. вопросам, неизбежно возникающим при реализации), поэтому вопрос о реализации в аппаратуре коэффициента подпомеховой видимости 181 дБ (с.21ар, 249д) остается открытым.

5. Используются термины «робастность по отношению к полезному сигналу» (с.8,9ар, 22д, 310д и др.), «робастность алгоритмов нейтрализации помех» (с.314д), «робастность нерекурсивного фильтра» (с.29ар, 339д), которые не находят теоретического обоснования. Робастность двухэтапного алгоритма режекции помех не доказана (с.314д). Критерий робастности и синтез робастных систем обработки в соответствии с выбранным критерием отсутствует.

6. В тексте диссертации и автореферата встречаются нечеткие высказывания и технические погрешности, например:

- В диссертации и автореферате автор употребляет фразы: «повышение *эффективности* обработки шумоподобных сигналов» (заглавие), «повышение *помехозащищенности* радиоэлектронных систем с шумоподобными сигналами» (с.70, 72д), «повышение *помехоустойчивости* выделения ШПС» (с.7ар, 11ар, 16ар, с.17, 23д) и т.д. Отсутствует авторское определение этих характеристик устройств обработки и систем.

- В п.5.3.2 «Обсуждение состава структурных схем ...» структурные схемы отсутствуют (с.316д).

- Вместо общеупотребительного отношения сигнал-шум автор использует энергетический потенциал $q_{\text{эп}}$, имеющий размерность дБГц (с.16,17ар, с.150д и др.), в то же время его изменения $\Delta q_{\text{эп}}$ оцениваются в дБ. Соотношение для расчета спектральной плотности N_0 противоречит общепринятому для моделирования (с. 150д).

- Применяются неудачные термины: «нейтрализация помех» – часто без уточнения и конкретизации смысла (с.8ар, 18,20д и др.); «ранне-поздний дискриминатор» (с.91д); «эффективное применение предварительной (предкорреляционной) обработки» (с.342д); «применим вероятность правильного выполнения поиска» (с. 146д); «переборный поиск» (с.143д и др.); уравнения (1.12), (1.14), (5.12), (5.28) и др. названы «формализмами» (БСЭ: «формализм – абстрактный *подход* к математике», а не уравнение); «способ набора ВКМ» (с.310); «для наделения алгоритмов ... робастными свойствами ... необходимо принять соответствующие меры» (с.311).

- В правой части соотношений (2.2), (2.4) отсутствует длительность опорного сигнала T_c (с.94д). Спектр синусоидального сигнала (2.3) ограниченной длительности записан ошибочно (с.93д).

- Не ясно, как сравнивались результаты моделирования (рис.3.1) с расчетами по соотношению (3.5), поскольку данное соотношение не зависит от энергетического потенциала $q_{\text{эп}}$ (с.149д).

- Алгоритм компенсации помехи (4.5) не учитывает возможность наличия полезного сигнала.

- Рис.5.3 и 5.4 совпадают, хотя помехи разные (с.307,308д).

- Не определено понятие «вероятность правильного выполнения поиска» и ее теоретический расчет (с.7,10,11,16ар, 146д и др.).

- Объем диссертации (458 с.) превышает рекомендуемый норматив, текст перегружен рисунками и графиками, в том числе для цветовой визуализации. Некоторые известные соотношения излагаются с большой детализацией, например, процедура быстрой свертки (с.144,145д), свертка и матричные вычисления (с.287-295д).

Заключение

Отмеченные недостатки являются частными и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Е.В. Кузьмина. В ней решена научная проблема повышения помехоустойчивости систем обработки фазокодомодулированных радионавигационных сигналов в условиях воздействия узкополосных помех, шумов приемника и шума квантования, имеющая важное хозяйственное значение. В диссертации дан детальный анализ различных задач разработки процедур одноканального приема и формирования сигналов: режекции и компенсации помех, поиска по задержке ФКМ сигналов, синтеза новых ШПС на основе атомарных функций. Результаты диссертации расширяют и углубляют теоретические основы оптимального приема сигналов в условиях воздействия помех и представления о механизмах повышения помехоустойчивости в этих ситуациях. В диссертации получены новые практические результаты, которые позволяют достичь значительного технического эффекта за счет повышения компактности спектра сигналов.

Результатом работы является внедрение и использование разработанных методов и алгоритмов в АО «Решетнёв», в учебном процессе ФГАОУ ВО «СФУ», а также при проведении научных работ различного уровня, что подтверждено двумя актами.

Опубликованные работы отражают основные разделы диссертации. Результаты, приведенные в диссертации, достаточно полно опубликованы в 40 научных работах, включая 2 монографии, 16 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 свидетельств о

государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы работы докладывались на международных и национальных научно-технических конференциях. Большая часть научных работ опубликована единолично.

Содержание представленного автореферата в целом соответствует содержанию, основным идеям и выводам диссертации.

Содержание диссертационной работы Е.В. Кузьмина на тему «Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приёме на фоне внешних помех» соответствует требованиям п.п. 4, 5, 13, 14 «Паспорта научной специальности 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация».

Диссертация Е.В. Кузьмина является завершённой научно-квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям п.п. 9,10,11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 16.10.2024 г.) «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям.

В связи с вышеизложенным, считаю, что автор диссертации – **Кузьмин Евгений Всеволодович** – заслуживает присуждения ученой степени *доктора технических наук* по специальности 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Официальный оппонент

Профессор кафедры радиотехники
Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный
университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых»
доктор технических наук, профессор

Костров
Виктор Васильевич

Подпись д.т.н., профессора В.В. Кострова удостоверяю.
Ученый секретарь Ученого Совета Муромского института (филиала)
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых



О.Н. Полулях

15 ноября 2025 г.

Костров Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники факультета информационных технологий и радиоэлектроники (ФИТР).

E-mail: kostrov.46@mail.ru Тел. раб. 8-(49234) 77-2-32

Рабочий адрес: Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (МИ ВлГУ)
602264, Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

Сайт организации: <https://www.mivlgu.ru/>

E-mail: oid@mivlgu.ru Факс/тел.: 8-(49234) 77-1-28