

О Т З Ы В

официального оппонента д.т.н., профессора Ю.Н. Паршина
на диссертационную работу Кузьмина Евгения Всеволодовича на тему
«Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при
одноканальном приеме на фоне внешних помех», представленную
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.2.16 Радиолокация и радионавигация

Основное направление развития радиотехнических, в том числе радионавигационных систем и устройств связано с улучшением их характеристик и показателей эффективности при функционировании в реальных условиях эксплуатации – наличием помех различного вида с неизвестными параметрами. Навигационные системы, как правило, являются системами коллективного пользования. Поэтому при их разработке важно руководствоваться правилами и регламентами, которыми в области навигации является Радионавигационный план Российской Федерации. В данном документе отражены все аспекты функционирования радионавигационных систем, в том числе описаны возможные типы помех. Одним из направлений борьбы с помехами является реализация средств защиты от помех в бортовой аппаратуре и средствах функциональных дополнений. Также эффективным методом защиты от помех является использование сигналов с кодовым разделением, то есть шумоподобных сигналов. Одним из основных развиваемых положений в диссертации является одноканальный прием радионавигационных сигналов. В настоящее время одноканальный прием хорошо изучен и освоен в практическом плане, что является его несомненным достоинством. Вместе с тем известны много примером использования нескольких антенн для подавления помех в радионавигационных системах. Это позволяет реализовать пространственную селекцию сигнала и помех, что во многих случаях является единственным возможным средством. Поэтому одноканальный прием может рассматриваться как неизбежное ограничение в некоторых случаях, а не как перспективное направление развития радионавигационной техники. Вместе с тем рассмотрение одноканального приема в данной работе позволяет акцентировать внимание и усилия исследователя на других направлениях повышения помехоустойчивости – селекция сигнала и помех на основе их спектральных различий. Это направление может считаться перспективным именно для подавления узкополосных помех.

Таким образом, тема и содержание диссертационного исследования Кузьмина Е.В., посвященные повышению эффективности обработки шумоподобных

И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

26 11 2025 г.

сигналов при одноканальном приеме на фоне внешних помех, является актуальной и практически значимой, а полученные в диссертации научные положения и результаты отвечают современным требованиям.

Для решения поставленных задач повышения помехоустойчивости обработки шумоподобных сигналов в диссертации используется комплексный подход, сочетающий методы спектрально-временного подавления помех и методы формирования помехоустойчивых сигналов. Данное направление в теории обработки сигналов широко известно под названием синтез пары сигнал-фильтр. Также известны работы, посвященные многокритериальному синтезу сигналов в сложной помеховой обстановке. Несмотря на высокие показатели помехоустойчивости при таком комплексном подходе решения получается, как правило, путем численной оптимизации, что неудобно в условиях изменяющейся помеховой обстановки. Условия функционирования современных радиосистем характеризуются априорной неопределенностью относительно статистических свойств помех и параметров сигналов. Возникает потребность в методах обработки, которые сочетают высокую помехоустойчивость, адаптивность и простоту технической реализации получаемых алгоритмов.

Рассмотрение только узкополосных помех, обоснованное ссылкой на Навигационный план РФ, естественным образом делает спектральный метод основным для решения задачи повышения помехоустойчивости. Подавление гармонических помех реализуется за счет спектральных различий сигнала и помехи, сводится к режекции помехи в спектральной области. Так как при этом также искажается часть спектра шумоподобного сигнала, то возникает задача анализа их влияния на эффективность решения целевой задачи, а также синтеза сигналов, устойчивых к подобного рода искажениям.

В диссертации подробно рассматривается обработка сигнала и компенсация помехи по выборке конечной длительности. Конечная протяженность выборки гармонической помехи, задаваемая длительностью шумоподобного сигнала, определяет минимальную ширину спектра выборки помехи. Соответственно предельная эффективность подавления ограниченной по длительности помехи будет меньше, чем эффективность более протяженной, чисто гармонической помехи. Этот резерв повышения помехоустойчивости в диссертации не использован.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и шести приложений.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, излагается степень разработанности темы исследования, формулируются цели и задачи дис-

сертации, а также объекты и предмет исследования, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, излагаются методы исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту и соответствие паспорту научной специальности. Рассматривается степень достоверности и приведены результаты апробации работы, а также сведения о публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе проведен анализ современного состояния теории и техники обработки шумоподобных сигналов на фоне помех с неравномерным спектром и одноканальным приемом. Оценены особенности и перспективы использования шумоподобных сигналов в измерительных радиоэлектронных системах. Проведен синтез новых форматов модуляции шумоподобных сигналов на основе атомарных функций. Проведен обзор известных помех и методов борьбы с ними. Описана структура диссертационной работы.

Во второй главе впервые проведен теоретический анализ частотных характеристик корреляционной обработки сигналов путем анализа преобразования гармонического сигнала с типовых процедурах обработки сигналов. Исследованы различные типовые устройства корреляционного типа. Получено выражение для скалярного произведения гармонического сигнала и шумоподобного фазоманипулированного сигнала. Проведен анализ частотных характеристик квадратурной корреляционной обработки сигналов на основе прямого и обратного преобразования Фурье.

Третья глава посвящена исследованию влияния узкополосных помех на качество функционирования процедуры беспорогового поиска шумоподобного сигнала. Обоснована процедура беспорогового поиска шумоподобных сигналов по задержке на основе прямого и обратного преобразования Фурье. Разработана методика анализа беспорогового поиска сигнала по задержке. Проведено исследование качества функционирования процедуры поиска сигнала по задержке на фоне теплового шума и шума квантования, а также на фоне гармонической помехи, теплового шума и шума квантования.

В четвертой главе исследуется эффективность подавления гармонических помех с использованием предварительных спектрально-пороговых, спектрально-поэлементных и спектрально-весовых преобразований наблюдаемого сигнала. Производится анализ влияния предварительной весовой обработки различного вида на эффективность спектрально-пороговой обработки. Исследуется алгоритм подавления гармонической помехи на основе предварительного спектрально-весового оценивания ее параметров. С использованием обобщенных показателей

качества подавления гармонических помех проводится анализ весовой обработки при различных типах весовых функций.

В пятой главе исследуется эффективность нерекурсивных алгоритмов подавления помех с неравномерным спектром совместно со спектрально-весовым оцениванием. Предложен модифицированный нерекурсивный алгоритм обработки сигналов на фоне помех в векторно-матричной форме записи. Проведено вычисление оценки корреляционной матрицы помех и шума по классифицированной выборке, а также обращение корреляционной матрицы. Проведен анализ показателей качества подавления помех, проведенный при наличии и отсутствии классифицированной выборки. Предложены варианты повышения робастности алгоритма подавления помех с неравномерным спектром. Спектрально-весовые оценки параметров гармонической помехи использованы для расчета оценки корреляционной матрицы помехи.

В шестой главе приведены результаты экспериментального исследования предложенных и модернизированных алгоритмов первичной и вторичной обработки шумоподобных сигналов. Проведены экспериментальное исследование алгоритмов подавления помех, обработка смеси сигнала и теплового шума на выходе радиотракта, подавление гармонической помехи методом спектральной режекции и методом спектрально-весового оценивания параметров помехи. Отдельно исследована эффективность вторичной обработки при длительных сеансах приема шумоподобных сигналов.

В заключении диссертации приведены основные выводы и результаты выполненной работы.

В приложениях содержатся дополнительные сведения к 1-5 главам диссертации, а также акты об использовании результатов диссертационного исследования.

Научная новизна исследования, выполненного в диссертационной работе, состоит в том, что в ней получены следующие новые научные результаты:

- впервые на основе обобщенной формулы Релея получены аналитические выражения для записи скалярных произведений шумоподобных сигналов, порожденными произвольными псевдослучайными последовательностями, и гармонической помехи с произвольными параметрами; получены результаты корреляционной обработки;

- установлено наличие периодических неравномерностей в спектрально-вероятностных зависимостях в виде «квазиколебательного» и «чашеобразного» поведения;

- установлено, что гармонические помехи способны оказывать заметное влияние на качество беспорогового поиска шумоподобного сигнала;
- обнаружена аномальная перестановка зависимостей вероятностей правильного поиска отношения помеха-сигнал и дано объяснение этому явлению;
- впервые изучено применение вариаций высоких порядков весовых функций семейства Кавченко для подавления гармонических помех;
- предложена новая методика обеспечения робастности нерекурсивного алгоритма подавления помех на основе выборочной корреляционной матрицы по неклассифицированной выборке;
- впервые на основе чипов в виде финитных атомарных функций созданы псевдослучайные сигналы, порождающие большое число новых шумоподобных сигналов, обладающих спектрально-корреляционными преимуществами по сравнению с известными сигналами.

Теоретическая ценность диссертационной работы в получении обобщенных и частных аналитических выражений для выходных эффектов процедур корреляционного типа при действии гармонической помехи с произвольными параметрами, изучении частотных характеристик корреляционных процедур обработки во временной и частотной областях. Обнаружены и объяснены аномалии в поведении спектрально-вероятностных зависимостей при действии многокомпонентной гармонической помехи. Обращено внимание на возможности спектральной режекции гармонических помех за счет выбора весовой функции предварительного взвешивания, в том числе при оценивании параметров гармонических помех с целью последующей их компенсации. Выработаны предложения по синтезу новых семейств шумоподобных сигналов на основе чипов атомарных функций; показаны их преимуществами по сравнению с известными сигналами.

Практическая значимость состоит в подробном изучении неравномерности влияния гармонических помех на результат корреляционной обработки шумоподобных сигналов, что определяет качество функционирования современных радиосистем, повышения алгоритмической эффективности Фурье-режекции помех и спектрально-весовой компенсации гармонических помех, повышении вычислительной эффективности процедур подавления гармонических помех, повышении эффективности вторичной обработки данных длительного сеанса приема. Все полученные результаты соответствуют направлениям модернизации навигационной аппаратуры, определенным в Радионавигационном плане Российской Федерации. Также практическая значимость результатов диссертации подтверждается двумя актами использования.

Обоснованность и достоверность предложенных подходов и полученных технических решений подтверждена корректным применением математического аппарата, согласованием расчетных данных, полученных с использованием численных методов, и прямого статистического моделирования, непротиворечивостью полученных результатов известным физико-техническим представлениям и результатам работ других авторов.

Диссертация Кузьмина Е.В. обладает внутренним единством, представляет собой законченную научную работу, отвечающую требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук. В диссертации последовательно развивается и уточняется центральная идея разработки научно-технических основ повышения эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приеме на фоне внешних помех. Результаты, полученные в работе, соответствуют поставленным целям и задачам, а результаты проведенных экспериментов и внедрений подтверждают теоретические положения диссертации и практическую ценность. Диссертация написана хорошим литературным языком с правильной акцентацией основных положений, результатов и выводов.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, представляя все ее главы. В нем обоснована актуальность темы исследования, поставлены задачи, определена научная новизна, приводится краткое описание глав и выводы, представлен перечень опубликованных работ автора, приведены результаты апробации диссертации и личный вклад автора.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных, всероссийских и зарубежных научно-технических конференциях и отражены в 40 печатных работах, из которых 16 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, причем 9 работ из названных выполнена без соавторов, а также в 1 монографии и 1 коллективной монографии. Соискателем получены 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении СЧ ОКР «Разработка материалов технического проекта и макета беззапросной измерительной системы помехоустойчивой» в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва», что подтверждается актом об использовании. Также результаты диссертационной работы использованы в ФГА-ОУ ВО «Сибирский федеральный университет» при выполнении НИР.

Диссертационная работа не лишена некоторых недостатков:

1. Критика пространственной компенсации внешних помех в пользу спектральной и временной компенсации внешних помех недостаточно аргументиро-

вана. Априорный отказ от многоканальной обработки значительно ограничивает возможности подавления помех.

2. Не проведено сравнение эффективности предложенных алгоритмов с оптимальными алгоритмами, полученными методами теории оптимальных статистических решений.

3. Не проведено сравнение эффективности предложенных алгоритмов и сигналов с известными алгоритмами и сигналами, совместно оптимизированными для конкретной сигнально-помеховой обстановки (синтез пары «сигнал-фильтр»).

4. Не отмечены все обстоятельства и ограничения, при которых, как утверждает автор, «временная обработка уступает спектральной обработке».

5. Внедрение результатов диссертационной работы Е.В. Кузьмина могло быть более широким, учитывая важность решаемых в диссертации задач.

6. Аналогия (с. 185) зависимостей вероятности от отношения помеха сигнал и энергopotенциала в виде АЧХ ФНЧ и ФВЧ некорректна и неуместна.

7. Оценивание частоты, амплитуды и фазы помехи исследовались многими авторами. Полученные оценки (4.17)-(4.19) не сравнивались по точности с другими результатами, в том числе с границей Крамера-Рао.

8. Анализ погрешностей на с. 215-218 проводится нестатистическим методом, то есть без усреднения. Отсюда следует, что природа погрешности связана с несовершенством алгоритма, а не с шумом.

9. На с. 291 в выражении общего характера (5.10) перепутан порядок символов усреднения и обращения оценки корреляционной матрицы.

10. На с. 293 формула (5.13) описывает не корреляционную матрицу помехи и шума, так как усреднение не производится. Возможно, подобный алгоритм дает улучшение, но меньше, чем оптимальный алгоритм, полученный методами теории оптимальных статистических решений.

11. При аппаратной реализации радиотракта частота дискретизации выбрана в несколько раз (2,86) больше промежуточной частоты. Эти требования сильно завышены, так как в цифровых радиоприемных устройствах частота прямой дискретизации выбирается в несколько раз больше ширины спектра сигнала.

Отмеченные недостатки не снижают высокий научный уровень диссертации, не опровергают ее теоретической и практической значимости и не препятствуют положительной оценке диссертационной работы в целом.

Тема исследования и в целом диссертация соответствуют Паспорту специальности 2.2.16 Радиолокация и радионавигация, в частности его п.п. 4, 5, 13, 14, 15, 20. Диссертация содержит новые научные результаты и положения, написана

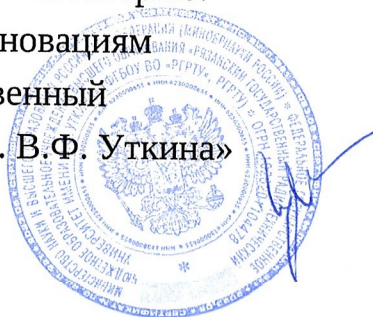
автором самостоятельно и свидетельствует о личном вкладе автора в науку, т. е. удовлетворяет требованиям п. 10 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ. Опубликованные в научных изданиях результаты работы соответствуют пп. 11, 13, 14 названного Положения.

Диссертационная работа Е.В. Кузьмина «Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приеме на фоне внешних помех» является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые научно-обоснованные технические решения, обеспечивающие эффективное функционирование радиотехнических систем, работающих в условиях действия внешних помех, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 названного Положения. Считаю, что автор диссертации Кузьмин Евгений Всеволодович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.16 Радиолокация и радионавигация.

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехнических устройств
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Ю.Н. Паршин

Подпись Паршина Юрия Николаевича заверяю.
Проректор по научной работе и инновациям
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»
доктор технических наук



С.И. Гусев

«26» 11 2025 г.

Служебный адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1;
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина»,
кафедра радиотехнических устройств;
служебный телефон: (4912)72-03-48;
E-mail: parshin.y.n@rsreu.ru