

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Тисленко Владимира Ильича на диссертацию Кузьмина Евгения Всеволодовича на тему "Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приёме на фоне внешних помех" по специальности 2.2.16. "Радиолокация и радионавигация" на соискание учёной степени доктора технических наук

Актуальность темы. Для реальных условий работы современных радиоэлектронных систем (РЭС) передачи-приема информации, радионавигации, радиолокации и управления характерно наличие различного вида помех, которые значительно снижают тактико-технические характеристики (ТТХ) РЭС. Способность РЭС сохранять ТТХ в условиях наличия различного вида помех является одним из ключевых параметров, определяющих их эффективность и возможность реального использования.

Научно-технические проблемы, связанные с обеспечением помехоустойчивости РЭС, находятся в центре внимания специалистов по проектированию радиосистем. Известны и достаточно хорошо исследованы способы и алгоритмы подавления сигналов внешних, сосредоточенных в пространстве источников помех, основанные на использовании адаптивных антенных решеток, выполняющих функции пространственного фильтра. Их применение в РЭС, использующих прием с одной слабонаправленной антенной (по одному каналу), в частности, в аппаратуре морских РНС или в мобильных приемниках ГНСС, очевидно, объективно невозможно.

Наличие помехи в условиях одноканального приема со слабо направленной антенной требует поиска устойчивых к влиянию помех структур псевдослучайных широкополосных сигналов (ПШПС), исследования алгоритмов их обработки, обеспечивающих повышение помехоустойчивости при решении в РЭС функциональных задач. Суть проблемы состоит в обеспечении фильтрации (выделении) слабых ПШПС на фоне помех. При этом научный интерес, в частности, связан исследованием неравномерности их влияния при различных значениях интенсивности и частоты.

Следует отметить, что тот традиционный ресурс по помехозащищенности РЭС, который реализуется при использовании ПШПС с большой базой и когерентной обработке в отсутствии помех, в ряде случаев, не обеспечивает достижения максимального подавления помехи и может быть повышен.

Таким образом, диссертационная работа автора посвящена актуальной научной проблеме, решение которой обеспечивает повышение эффективности фильтрации слабоинтенсивных ПШПС в плане повышения вероятности правильного поиска этих сигналов при наличии разного типа помех. Достоверность и точность решения этой функциональной задачи определяют работоспособность РЭС с ПШПС.

Именно эти проблемы, характерные для реальных условий работы навигационных РЭС, использующих один ненаправленный пространственный канал

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«26» 11 2025 г.

приема, являются предметом исследования в диссертационной работе Е. В. Кузьмина.

Содержание поставленных в работе научных задач и результаты их решения, безусловно, актуальны для теории и практики разработки и модернизации РЭС указанного класса и соответствуют уровню докторской диссертации.

Содержание диссертации. Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, степень ее проработки в научной литературе. Автор определяет предмет теоретических исследований, цель и задачи работы, их практическую значимость с указанием данных, содержащихся в публикациях и его личном вкладе в изучение обозначенной научной проблемы.

В первой главе приведен обзор видов помех и способов борьбы с ними. Показана актуальность решения научной проблемы, связанной с выделением слабых ПШПС на фоне помех в условиях одноканального приема со слабо направленной или ненаправленной антенной. Акцент сделан на опасных для рассматриваемых РЭС помехах, обладающих неравномерным спектром. Это узкополосные помехи (гармонические однокомпонентные и многокомпонентные), указанные в Радионавигационном плане Российской Федерации, а также структурно-подобные. Также в первой главе автором предложен и исследован новый тип ПШПС, основой которого является атомарная форма элементарных импульсов, образующих псевдослучайную последовательность.

Во второй главе представлены оригинальные исследования влияния гармонической помехи на характеристики отклика при корреляционной обработке ПШПС для случая опорных сигналов произвольного вида и ряда частных случаев. Впервые проведен тщательный теоретический анализ и получены зависимости параметров отклика коррелятора на помеху с изменяющимся частотным положением для произвольного вида опорного сигнала. Автор аналитически получил соотношение для общего случая, и выполнил прямое математическое моделирование, которое подтверждает достоверность полученных соотношений. В главе выполнен теоретический анализ воздействия гармонической помехи на типовые процедуры корреляционной обработки при опорных ПШПС с фазокодовой модуляцией. Теоретический анализ выполнен и для практически важного варианта реализации алгоритма корреляционной обработки в спектральной области, при котором значимо сокращается время поиска ПШПС.

В третьей главе приведены оригинальные исследования влияния параметров узкополосных помех и шума на вероятность P успешного завершения процедуры поиска. Предложена методика оценки этой вероятности и представлены семейства зависимостей вероятности P при заданном значении энергопотенциала радиолинии как функции частоты помехи $\omega_{\text{помехи}}$ и величины отношения помеха/сигнал $q_{\text{п/с}}$. Установлены значимые для приложений особенности зависимостей $P(\omega_{\text{помехи}})$ с учетом влияния эффектов, возникающих при цифровой обработке. Теоретический анализ, выполненный во 2-й главе работы, дает объяснение этих закономерностей. В главе выполнен анализ влияния однокомпонентной и многокомпонентной гармонических помех для случая фиксированного и стохастического положения спектральных компонентов.

В четвёртой главе приведены новые результаты по анализу подавления узкополосных помех применительно к спектрально-пороговой, спектральной поэлементной и спектрально-весовой обработке. В частности, дано обоснование вида весовых функций (ВФ) для предварительного взвешивания реализаций смеси помех и ПШПС. Рассмотрены классические ВФ (Ханна, Хеннинга, Парзена и др.) и современные – финитные атомарные ВФ Кравченко и их комбинации с классическими. Исследование проведено с общих методических позиций и включает изучение коэффициента подавления помех, а также влияние подавителей на полезный сигнал (прохождение полезного сигнала через режектор).

Автор выполнил статистический анализ эффективности применения ВФ для решения целевой задачи поиска ПШПС на фоне узкополосных помех. Важной частью этих исследований являются результаты по компенсационному подавлению помехи за счёт предварительного спектрально-весового оценивания её параметров. Здесь изучены точностные характеристики оценок параметров помехи при её грубой дискретизации и получено обобщающее соотношение для спектрально-весового оценивания параметров помехи при степенной вариации ВФ Хеннинга.

В пятой главе приведены результаты разработки и статистического исследования алгоритмов подавления помехи, основанных на использовании информации о её корреляционных свойствах. Оценка пополненной корреляционной матрицы формируется при этом по ограниченной последовательности отсчётов дискретизированной реализации смеси. В реальных условиях одноканального приема объем выборки, необходимый для формирования оценки корреляционной матрицы и последующего ее обращения, составляет от единиц до десятков тысяч на периоде ПШПС. В работе для вычисления обратной матрицы автор применил эффективный алгоритм Шермана-Моррисона что позволило выполнить исследование эффективности поиска ПШПС в условиях узкополосных и структурно-подобных помех в условиях предварительной фильтрации. В главе показано, что предложенный алгоритм подавления помехи, в котором предварительно выполняется нейтрализация сигнальной компоненты, дает в итоге значимое подавление помехи (повышение допустимого отношения $q_{п/с}$ до 20 дБ).

В шестой главе приведены результаты экспериментального исследования эффективности спектральных подавителей применительно к поиску ПШПС на фоне интенсивных узкополосных помех. Исследование выполнено в лабораторных условиях с использованием физического имитатора ПШПС ГНСС и элементов приемного тракта. Полученные данные в режиме постобработки использованы для верификации характеристик разработанных в работе алгоритмов подавления помех. В главе также выполнена НЧ-фильтрация данных, зарегистрированных приёмником ГНСС при пролёте навигационного космического аппарата. В итоге экспериментально показана высокая эффективность спектрального подавителя и Фурье-фильтрации в задаче подавления помех.

Рукопись диссертации содержит 458 с., из них 383 с. основного текста, включая подробный перечень использованных автором сокращений и условных обозначений. Список использованных источников содержит 275 наименований.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и требованиям, предъявляемым к авторефератам докторских диссертаций.

Публикации автора по теме диссертации и апробация результатов. Автором опубликовано 16 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Минобрнауки России и в журналах, приравненных к перечню ВАК. В них достаточно полно изложены основные научные результаты диссертации. Среди них 10 статей опубликованы без соавторов. Это, очевидно, определяет существенный вклад автора в полученные результаты, а также его личный вклад в науку. Публикации представлены в авторитетных научных изданиях: Радиотехника, Цифровая обработка сигналов, Успехи современной радиоэлектроники, Радиотехника и электроника и др. Автор имеет 5 объектов интеллектуальной собственности в форме зарегистрированных программ для ЭВМ, опубликованную монографию и статью в коллективной монографии. Кроме того, опубликованы многочисленные статьи в сборниках научных трудов Международных и Всероссийских конференций, что говорит о высоком уровне апробации результатов диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность, новизна и значимость для теории и практики.

Представленная к защите диссертационная работа содержит новые научные и научно-практические результаты. Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в ней по итогам исследований, обоснованы и достоверны. Они значимы и представляют интерес для специалистов по разработке перспективных РЭС, использующих ПШПС в условиях наличия помех при одноканальном приеме со слабо направленной антенной.

Выводы первой главы по обзору известных видов помех и способов борьбы с ними согласуются с общей концепцией повышения устойчивости функционирования радионавигационных систем, изложенной в радионавигационном плане Российской Федерации и подтверждаются практикой приёма сигналов ГНСС. Новый предложенный автором и опубликованный вид ПШПС с атомарной формой элементарных импульсов, образующих псевдослучайную последовательность, изучен на основе классического аппарата спектрального анализа сигналов. Теоретические результаты в этом плане корректны и согласуются с физической стороной вопроса.

Постановка задачи и способ теоретического анализа воздействия внешнего помехового гармонического воздействия на коррелятор и рассмотренные процедуры обработки ПШПС (глава 2) адекватны содержанию проблемы. Результаты анализа и их интерпретация, являются верными и обоснованными. Они также подтверждаются данными численного моделирования.

Результаты теоретического анализа являются новыми и представляют интерес для специалистов по системотехническому проектированию РЭС. В работе строго показано существенное влияние частотной локализации гармонической помехи на параметры отклика коррелятора. Интересно, что это влияние изменя-

ется от невыраженной чувствительности к помехе, до опасного и нарушающего работу влияния, что важно – при одинаковой энергетике и минимальных отличиях по частоте.

Результаты анализа обобщают и теоретически объясняют частные разрозненные публикации в этой области, полученные при различных показателях качества целевой обработки. Автор тщательно и всесторонне исследовал процессы влияния помехи на параметры системы поиска. Им получены аналитические выражения отклика коррелятора на помеху для произвольного опорного сигнала и в этом их значимая научно-практическая ценность.

Частные соотношения, полученные автором для случая опорных фазоманипулированных ПШПС коррелятора, также обладают максимальной и широко полезной общностью. Они записаны для произвольной формы символов псевдослучайного кода, произвольных амплитудных и частотно-временных параметров помехи и опорных ПШПС. Отметим, что теоретический расчёт для отклика коррелятора на одно тональную помеху при произвольном (частном) опорном сигнале дает возможность выполнения аналогичных расчётов для много тонального случая при произвольной локализации компонентов, а также на разнообразные полосовые помехи с произвольными параметрами отдельных компонентов.

Результаты гл. 3 получены методом статистического моделирования при достаточном объёме статистических испытаний. Они показывают уверенное согласование статистического модельного описания процедуры поиска и аналитического при наблюдении ПШПС на фоне шума. Дальнейшее усложнение модели воздействия, связанное с введением технико-технологических ограничений и мощного тонального помехового фона, приводит к логически объяснимым результатам. Статистически на примерах подтверждены результаты гл. 2, в том плане, что гармоническое помеховое воздействие при несущественных отличиях частоты и равной энергетике может существенно различно влиять на корреляционную процедуру выделения ПШПС – в частности на поиск сигнала. Полученные результаты являются новыми, они обоснованы и представляют научно-практический интерес поскольку определяют научный и практический инструментарий для выработки методик тестирования аппаратуры и выявления её соответствия требованиям по помехозащищённости.

Значимость, достоверность, и новизна исследований, выполненных в гл. 4, по изучению алгоритмических возможностей подавления помех (не менее 40 дБ) при обработке в спектральной области обусловлена рассмотрением этой проблемы с различных методических позиций. В работе выполнено исследование спектральных подавителей как таковых в условиях применения различных ВФ, которые существенно определяют достигаемый эффект. Вместе с тем изучено неизбежное подавление сигнала и показаны возможные энергетические потери (единицы дБ). При этом исследование спектральных алгоритмов подавления выполнено в составе процедуры выделения полезного ПШПС на примере поиска ПШПС при воздействии интенсивных помех с изменяющимся уровнем и частотным положением. Убедительно показано, что весовая обработка с применением предложенных ВФ существенно повышает уровень подавления помехи (дополнительно до 20 дБ).

Новыми и значимыми результатами гл. 5 являются разработка концепции организации процедуры поиска ПШПС по временной задержке при наличии помех с неравномерным спектром и исследование её вероятностных характеристик. Разработанный алгоритм фильтрации использует оценочную пополненную корреляционную матрицу. В работе показана работоспособность алгоритма поиска ПШПС при повышенных допустимых отношениях помеха/сигнал для фиксированной величины энергопотенциала. Достигнутая вероятность правильного поиска по задержке не менее 0.9 является очень хорошим результатом при наличии мощного помехового фона. Научный интерес представляют исследования и предложенные способы модификации алгоритмов подавления помех, их применимость для поиска ПШПС при действии помехи с неравномерным спектром.

Автор показал устойчивость (робастность) новых алгоритмов к априорно неизвестной задержке сигнальной компоненты и их более высокую помехоустойчивость по сравнению с традиционными вариантами реализации алгоритмов поиска. В частности, в условиях поиска полезного ПШПС на фоне белого гауссовского шума и структурно-подобной помехи повышение помехоустойчивости составляет до 9 дБ.

Алгоритмы эффективны при сравнительно высоких значениях энергопотенциала (более 45 дБ-Гц). Однако такие ситуации часто имеются в практике приёма ПШПС. Достоверность полученных результатов обоснована достаточным объёмом статистических испытаний и правильностью методики испытаний.

Экспериментальные исследования (гл. 6) выполнены методически корректно. Новые экспериментальные результаты представлены в понятной и наглядной форме. Показано, что при отсутствии защиты от мощной помехи положение максимума выходного эффекта смещается относительно истинного временного положения ПШПС. Убедительно показано, что применение разработанных спектральных алгоритмов подавления обеспечивает работоспособность процедуры поиска вплоть до превышения помехи над сигналом до величины 74 дБ. Это является очень хорошим результатом для одноканального варианта построения аппаратуры в условиях ее работы при реальной величине энергопотенциала 40 дБ-Гц.

Эксперименты в целом подтверждают полученные автором теоретические результаты.

Таким образом, достоверность и обоснованность полученных в диссертации Е. В. Кузьмина результатов, сформулированных научных положений, рекомендаций и выводов подтверждается корректным использованием аппарата математической статистики и статистической радиотехники, методов статистического моделирования. В работе показано соответствие теоретических оценок с результатами моделирования и экспериментальных исследований. Актуальность и достоверность научно-технических результатов подтверждается также их практическим использованием в опытно-конструкторских работах по созданию и исследованию технических характеристик опытных образцов радионавигационной аппаратуры.

Замечания по итогам изучения диссертационной работы состоят в следующем.

1. Применённая для синтеза нового ПШПС весовая функция $ur(t)$ приводит к наличию вынужденной амплитудной модуляции, что нежелательно, поскольку при этом повышается пик-фактор (п. 1.2.3.1, выр. (1.11), гл. 1).

2. Рассмотрение процедуры поиска ПШПС в различных условиях приёма проводится без указания времени, необходимого для успешного завершения поиска (гл. 3, 4). Непонятно как помеховый фон влияет на данный показатель.

3. Результаты, полученные в п. 5.3.3.2 (гл. 5), которые определяют повышение помехоустойчивости поиска ПШПС при действии структурно-подобной помехи, автор сравнивает с параметрами алгоритма с корреляционной обработкой, реализуемой в форме (3.1). Однако этот алгоритм в условиях наличия помех является далеко не лучшим.

4. При рассмотрении компенсационного решения (гл. 4), основанного на спектральных измерениях, автор предполагает стационарность обстановки, а следовало бы дополнительно изучить случай изменяющейся частоты помехи.

5. Однотональная гармоническая помеха имеет известную форму временной автокорреляционной функции. Необходимо лишь знать ее несущую частоту. Означает ли это, что вопрос получения классифицированной выборки с целью формирования оценки корреляционной матрицы помехи, которая некоррелирована с собственным шумом приемника, может быть решен значительно проще?

6. Автор достаточно часто применяет "длинные" формулировки, представленные в формате одного предложения (например, 9 строк, см. выводы к гл.6). Это значительно затрудняет восприятие содержания.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку качественной и комплексной работы автора.

Заключение по диссертации. Полученные в диссертационной работе результаты вносят существенный вклад в развитие теории и практики обработки ПШПС при воздействии на входе РЭС интенсивных помех в условиях приема на слабонаправленную одиночную антенну, когда, по существу, оптимизация предполагает использование только временного ресурса. Этот вклад состоит в разработке комплекса проблем, связанных с аналитическим исследованием влияния помех и практической разработкой эффективных алгоритмов решения ключевой функциональной задачи в РЭС – поиска ПШПС с учетом реальных помеховых условий работы.

Диссертация Кузьмина Евгения Всеволодовича соответствует специальности 2.2.16. "Радиолокация и радионавигация" (технические науки), по пп. 4, 5, 13, 14, 15, 20 паспорта данной специальности. Она обладает внутренним единством достижения поставленной автором цели и является завершённой научно-квалификационной работой, посвященной решению важной научно-технической проблемы повышения помехоустойчивости РЭС при ненаправленном приеме ПШПС. Проблема имеет важное прикладное значение в плане проектирования перспективных РЭС с улучшенными ТТХ.

Диссертация Е. В. Кузьмина "Повышение эффективности обработки шумоподобных сигналов при одноканальном приёме на фоне внешних помех" соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, указанным в пп. 9, 10, 11, 12, 13, 14 "Положения о присуждении учёных степеней" утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024 г.) "О порядке присуждения учёных степеней". Автор работы – Кузьмин Евгений Всеволодович достоин присуждения ему учёной степени доктора технических наук.

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело и их дальнейшую обработку для процедуры защиты диссертации.

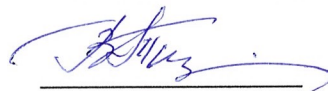
Официальный оппонент

Доктор технических наук
(05.12.14 – Радиолокация
и радионавигация), профессор,
Заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации,

профессор кафедры
"Радиотехнические системы"
ФГАОУ ВО "Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники" (ТУСУР),

главный научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории
радионавигации научно-
исследовательского института радио-
технических систем ТУСУР

Тисленко Владимир Ильич



18 ноября 2025 года

Подпись доктора технических наук, профессора В. И. Тисленко заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники"

Почтовый адрес: 634034, г. Томск,
ул. Вершинина, 47, кафедра РТС,
ФГАОУ ВО "Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР)
Телефон: 8-(3822)-41-36-70
Эл. адрес: wolar1491@yandex.ru



Прокопчук Елена Викторовна

