

На правах рукописи



Козлов Сергей Александрович

**Временная обработка сигналов, отраженных от малоразмерных и
малоскоростных объектов в присутствии помех**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2025

Работа выполнена на кафедре радиотехники в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (Университет Лобачевского, ННГУ).

**Научный
руководитель:**

Фитасов Евгений Сергеевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники ННГУ, г. Нижний Новгород

**Официальные
оппоненты:**

Сидоркина Юлия Анатольевна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автономные информационные и управляемые системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

Фадеев Роман Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные радиосистемы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), г. Н. Новгород

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»), г. Саров

Защита состоится 4 марта 2026 года в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/1598>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 426, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.340.03.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.03,
д. ф.-м. н., проф. каф.
радиотехники

А.В. Клюев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и степень разработанности темы

В настоящее время одной из актуальных задач является разработка методов повышения эффективности обнаружения малоскоростных малоразмерных летательных аппаратов (ЛА), например, легкомоторные самолеты, вертолеты, мотодельтапланы, на фоне активных и пассивных помех (ПП) различного происхождения. Развитие радиоэлектронных технологий в последнее десятилетие способствовало появлению и широкому использованию нового класса ЛА: мини- и микро-БПЛА. Основные характеристики данного класса объектов - малая эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) $10^{-1} \div 10^{-3}$ м², малые высоты полета (0 \div 10³ м), невысокие скорости полета (0 \div 70 м/с), новые маневренные возможности существенно затрудняют задачу их обнаружения существующими радиолокационными системами.

Оптимальные (квазиоптимальные) методы пространственной и временной обработки, реализованные в существующих радиолокационных системах позволяют с достаточной степенью эффективности обнаруживать сигналы, отраженные от аэродинамических целей различных типов (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты и др.) в том числе на фоне пассивных и активных помех. Однако, в рассмотренных выше случаях обнаружения (разрешения, распознавания) легкомоторных воздушных объектов, спектр отраженных радиосигналов, как правило, имеет сложную многомодовую структуру. Это обусловлено наличием в одном разрешаемом объеме сигналов, отраженных от целей и ПП (местных предметов (МП), подстилающей поверхности, гидрометеоров, организованных дипольных помех), эффектом пропеллерной модуляции для воздушных объектов с винтовым двигателем, фазочастотными флуктуациями в сигналах имитационных помех. Поэтому существующие методы пространственной и временной обработки в данных ситуациях уже не будут строго оптимальными (квазиоптимальными) и, следовательно, столь же эффективными. Таким образом, является **актуальными** задачи анализа существующих методов обработки сигналов по оценке их эффективности при обнаружении (разрешении, распознавании) легкомоторных воздушных объектов (БПЛА) и синтеза новых методов, учитывающих особенности в структуре принимаемых радиосигналов в сложной сигнально-помеховой обстановке.

С учетом вышеприведенных факторов в диссертационной работе рассмотрены три круга задач, возникающих при обнаружении (разрешении, распознавании, селекции) легкомоторных воздушных объектов каждому из которых посвящена отдельная глава диссертации.

Первый круг задач, решаемый в работе, посвящен селекции слабых сигналов с близкими к нулю доплеровскими сдвигами частоты на фоне интенсивных ПП.

Очевидно, что сигналы, отражённые от целей с близкими к нулю радиальными скоростями, попадают в зону режекции частотной характеристики фильтров системы селекции движущихся целей и селектируются как помехи. Это, в свою очередь, приводит к необнаружению цели или сбросу сопровождаемой трассы.

Исходя из вышеизложенного, является **актуальной** задача проведения анализа проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов по оценке возможности обнаружения сигналов, отражённых от малоскоростных воздушных объектов (с близкими к нулю радиальными скоростями), на фоне интенсивных отражений от МП и подстилающей поверхности с минимальными потерями в отношении сигнал-шум (ОСШ).

Помимо селекции слабых полезных сигналов на фоне интенсивных помех для малоразмерных малоскоростных ЛА в радиолокационных системах мониторинга воздушного пространства остро стоит задача распознавания и классификации воздушных объектов с винтомоторными двигателями. Исследованию выявления модуляционных признаков вторичного излучения для упомянутых ЛА посвящена вторая группа задач, решаемых в диссертации.

Задачу распознавания радиолокационных сигналов с вторичной модуляцией можно представить как задачу обнаружения слабого сигнала с флуктуациями частоты на фоне сильного детерминированного сигнала. Известно, что в данном случае энергия сигнала будет перераспределяться между сигнальным и шумовыми собственными числами (СЧ) выборочной корреляционной матрицы (КМ) процесса.

Третий круг вопросов, затрагиваемых в диссертации относится к задаче селекции в радиолокационных системах имитирующих или сигналоподобных (интеллектуальных) помех, формирующих ложные воздушные цели - ЛВЦ. Появление современных сверхманевренных ЛА, способных выполнять маневры, приводящие к сложным законам изменения координат объекта (и их производных), делает задачу обнаружения имитирующих радиопомех по результатам трассовой обработки более затруднительной.

Очевидно, что для случая селекции имитационной помехи и сигнала, отраженного от ЛА с винтовым двигателем, спектр которого будет иметь многомодовую структуру или шумоподобный вид, полученные решающие статистики не будут строго оптимальными.

Таким образом, является **актуальной** задача синтеза метода селекции имитирующей помехи и сигнала, отраженного от ЛА, в т.ч. с винтовым двигателем, учитываяющего многомодовую структуру спектра полезного сигнала.

Цель работы

Целью диссертационной работы является анализ и синтез методов временной обработки радиолокационных сигналов, отраженных от малоразмерных и малоскоростных воздушных объектов, в т.ч. с винтовым двигателем, в импульсных когерентных радиолокационных системах.

Задачи работы

1. Провести анализ математических моделей и результатов экспериментальных исследований по обнаружению малоскоростных и малоразмерных воздушных объектов на основе проекционного метода доплеровской фильтрации когерентной пачки импульсов.

2. Синтезировать метод распознавания радиолокационных сигналов с вторичной модуляцией на основе анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы.

3. Синтезировать метод селекции имитирующих радиопомех и сигналов, в том числе отраженных от винтовых летательных аппаратов, на основе оценки количественной меры степени когерентности радиолокационных сигналов.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, математической статистики, методы радиофизических измерений, теории антенн, матричной алгебры, численное моделирование, а также натурные экспериментальные исследования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально исследованный проекционный метод квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов позволяет обеспечить обнаружение малоскоростных и малоразмерных воздушных объектов на фоне интенсивных отражений от местных предметов и подстилающей поверхности.

2. Предложенный метод распознавания сигналов на основе анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы обеспечивает распознавание сигналов, отраженных от летательных аппаратов с винтовым двигателем.

3. Предложенная, запатентованная и экспериментально исследованная система селекции имитирующих радиопомех на основе оценки энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы обеспечивает селекцию сигналов, отраженных от летательных аппаратов с винтовым двигателем.

Научная новизна работы

1. Впервые обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения проекционного метода квазиоптимальной межпериодной обработки при обнаружении сигналов, отраженных от малоскоростных и малоразмерных летательных аппаратов на фоне сигналов, отраженных от подстилающей поверхности и местных предметов.

2. Предложен новый метод распознавания сигналов на основе анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы, отраженных от летательных аппаратов с винтовым двигателем, обеспечивающий, в отличии от существующих методов сверхразрешения, распознавание сигналов с частотными флюктуациями сигналов пропеллерной составляющей.

3. Теоретически обоснован, экспериментально подтвержден и запатентован новый метод селекции имитирующих помех и сигналов, отраженных от летательных аппаратов с винтовым двигателем на основе оценки энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы.

Теоретическая значимость работы

Полученные результаты численного моделирования и натурных экспериментов по обнаружению, селекции и распознаванию сигналов с фазо-частотными флуктуациями могут быть использованы для развития теории приема и обработки сигналов.

Практическая значимость работы

Практическая значимость результатов работы связана с необходимостью проектирования систем пространственно-временной обработки сигналов современных систем мониторинга воздушного пространства, в том числе при обнаружении и распознавании малоразмерных малоскоростных воздушных объектов (беспилотных летательных аппаратов). Запатентованные технические решения могут быть использованы в разработке перспективных радиотехнических систем мониторинга воздушного пространства.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, результатов проведенных исследований и выводов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается результатами сравнения компьютерного моделирования и натурных экспериментов, соответствием с опубликованными ранее результатами в данной области, отсутствием противоречий результатов диссертации с известными теоретическими положениями статистической радиофизики, а также результатами сравнения полученных теоретических выводов с результатами обработки экспериментальных данных. Полученные в работе результаты подтверждаются обсуждением в публикациях в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК.

Апробация результатов

Основные положения, выводы и результаты исследования были представлены и обсуждены на научных конференциях: на международных конференциях: на международных конференциях: на XVII и XXVIII международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2011, 2022), на XXIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - ИСТ-2017» (г. Н. Новгород, 2017), на 12-й международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (г. Владимир, 2017); на всероссийских конференциях: на XV, XVI и XVII Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и др. стран мира, сравнительный анализ» (г. Ярославль, 2014, 2015, 2016), на IV-й научно-технической конференции «Радиолокация. Теория и практика» (г. Н. Новгород, 2022); на региональных конференциях: на XIV-й, XV-й, XVI-й, XVII-й, XIX-й, XX-й, XXV-й, XXVI-й, XXVII-й, XXIX-й научных конференциях по радиофизике (г. Н. Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2021, 2022, 2023, 2025).

Публикации

По теме диссертации автором опубликована 37 работ: 10 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 4 по специальности 1.4.3 - Радиофизика); 4 статьи в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus; 2 патента РФ на полезную модель и 1 патент РФ на изобретение; 1 статья в региональном научном издании; 4 статьи и тезисов докладов в сборниках трудов международных научных конференций; 4 тезиса докладов в сборниках трудов всероссийских научных конференций; 11 статей и тезисов докладов в сборниках трудов региональных научных конференций.

Личный вклад

Все приведенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Кроме непосредственной теоретической разработки методов, автор лично участвовал в их программной реализации и экспериментальной апробации, включая проведение натурных экспериментов.

Диссертационная работа выполнялась при поддержке:

Государственного задания Минобрнауки РФ (базовая часть) (соглашение FSWR-2023-0036) – пп. 2.2.1; 2.2.2 и 3.4 диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и задачи, представлены основные положения, выносимые на защиту, указана научная новизна, обозначена теоретическая и практическая значимость работы, характеризуется степень обоснованности и достоверности научных положений, результатов проведенных исследований и выводов. Отражен личный вклад автора, а также приведено краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу математических моделей и результатов экспериментальных исследований по обнаружению малоскоростных воздушных объектов на основе проекционного метода доплеровской фильтрации.

В разделе 1.1 показана возможность синтеза фильтров с различной шириной зоны режекции частотной характеристики, обеспечивающих обнаружение малоскоростных целей на фоне ПП в заданном диапазоне радиальных скоростей.

В случае, если уровень ПП намного превышает уровень полезного сигнала от 10 и более дБ (на практике это случай отражений от интенсивных МП) обратную КМ помехи можно аппроксимировать матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помехи:

$$\mathbf{M}^{-1} \approx \mathbf{I} - \mathbf{P}, \quad (1)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{\Phi}(\mathbf{\Phi}^* \mathbf{\Phi})^{-1} \mathbf{\Phi}^*$ – матрица-проектор на подпространство помехи, $\mathbf{\Phi} = [\mathbf{S}(\omega_1), \mathbf{S}(\omega_2), \dots, \mathbf{S}(\omega_M)]$ – матрица, составленная из вектор-столбцов сигналов, доплеровские сдвиги частот которых $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ перекрывают диапазон частот ПП, \mathbf{I} – единичная матрица, индекс * обозначает эрмитово сопряжение.

С учетом приближения (1) оптимальный весовой вектор межпериодной обработки примет вид

$$\mathbf{W} = (\mathbf{I} - \mathbf{P})\mathbf{S}(\omega), \quad (2)$$

а квазиоптимальная процедура обработки будет состоять в вычислении модуля выражения

$$\xi = \mathbf{X}^* (\mathbf{I} - \mathbf{P})\mathbf{S}(\omega_0), \quad (3)$$

где \mathbf{X} – вектор, соответствующий принимаемому сигналу (пачке импульсов), \mathbf{S} – вектор, соответствующий полезному сигналу, ω_0 – доплеровский сдвиг частоты полезного сигнала.

Передаточная характеристика когерентного межпериодного фильтра (настроенного на ω_0), реализующего алгоритм (3) определяется выражением

$$K(\omega) = \frac{|\mathbf{S}^*(\omega)(\mathbf{I} - \mathbf{P})\mathbf{S}(\omega_0)|}{N}, \quad (4)$$

где N – количество импульсов в пачке.

Из рис. 1 видно, что сигнал от воздушного объекта при $\omega T \approx 0,05$ (для $\lambda = 0,2$ м это соответствует радиальной скорости объекта 4 м/с) будет проходить без потерь при параметре фильтра (количество нулей зоны режекции) $M = 3$. T – период зондирования радиолокационных импульсов. При $M = 9$ без потерь будет обнаруживаться воздушный объект с нормированным доплеровским сдвигом частоты $\omega T \approx 0,1$ (8 м/с). На рис. 2 при $M = 9$ и $N = 256$ обеспечивается уверенное обнаружение объектов с радиальными скоростями ~ 12 м/с ($\omega T \approx 0,15$).

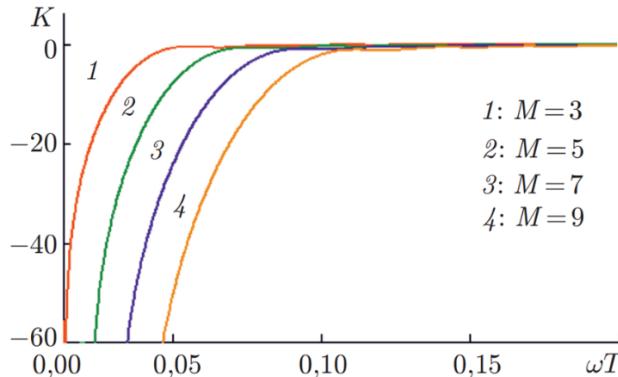


Рис. 1. Зависимости коэффициентов передачи полезного сигнала от произведения ωT для $N = 256$ при различных значениях M

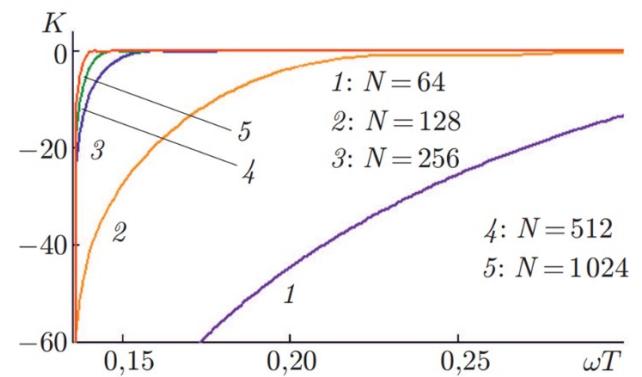


Рис. 2. Зависимости коэффициентов передачи полезного сигнала от произведения ωT при $M = 9$ и различных значениях N

Раздел 1.2 посвящен оценке эффективности способа межпериодной обработки сигнала, основанного на проекционном методе доплеровской фильтрации (коэффициент передачи K_1 на рис. 3) по отношению к оптимальному алгоритму согласованной фильтрации при обнаружении малоскоростных целей.

Сравнение эффективности проведено с наиболее распространенным двухэтапным способом межпериодной фильтрации, состоящем в предварительном когерентном подавлении ПП с последующим когерентным, некогерентным или смешанным (когерентно - некогерентным) накоплением полезного сигнала (коэффициент передачи K_2).

Из сравнения кривых на рис. 3 следует, что коэффициенты K_1 и K_2 на частоте ω_0 имеют для двух рассматриваемых способов разные значения, причём в предлагаемом способе этот коэффициент на несколько дБ больше.

Из анализа рис. 4, видно, что, например, при $N = 120$ и $M = 20$, почти во всём диапазоне изменения доплеровского сдвига частот полезных сигналов выходное ОСШ проекционного способа межпериодной фильтрации K_1 практически не отличается от значения этого показателя при согласованной обработке, резко уменьшаясь только в интервале частот, непосредственно прилегающем к зоне режекции. Тогда как для второго из рассматриваемых способов полностью когерентной фильтрации существенные потери в ОСШ K_2 имеют место на гораздо большем интервале частот.

В разделе 1.3 получены решающие статистики и исследованы характеристики обнаружения и распознавания слабого сигнала с флуктуациями частоты на фоне сильного детерминированного сигнала с частотными интервалами, меньшими релеевского интервала разрешения $\Delta f = 1$ (с разрешающей способностью выше релеевского предела линейных методов). Данная сигнально-помеховая ситуация характерна для обнаружения и разрешения малоскоростных и малоразмерных целей на фоне интенсивных ПП. Эта задача решена на основе оценки СЧ выборочной КМ сигнала с применением интегральной функции распределения максимального шумового СЧ.

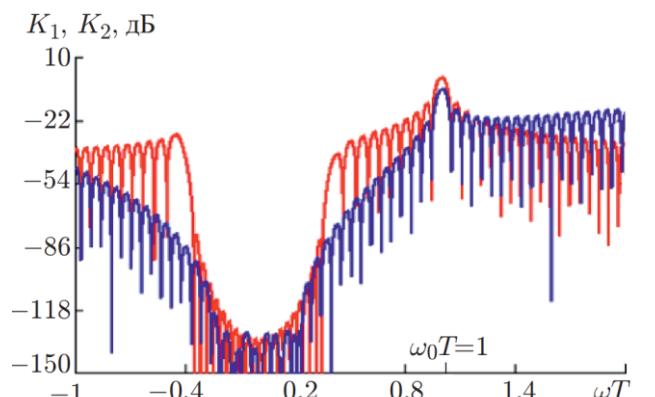


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика для K_1 (красная линия) и K_2 (синяя линия)

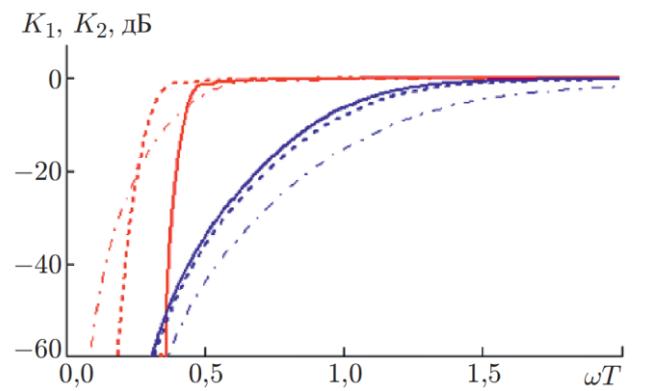


Рис. 4. Зависимости нормированных K_1 (красные линии) и K_2 (синие линии) для разных параметров фильтра: $N = 20, M = 3$ (штрих-пунктир); $N = 80, M = 10$ (пунктир); $N = 120, M = 20$ (сплошной)

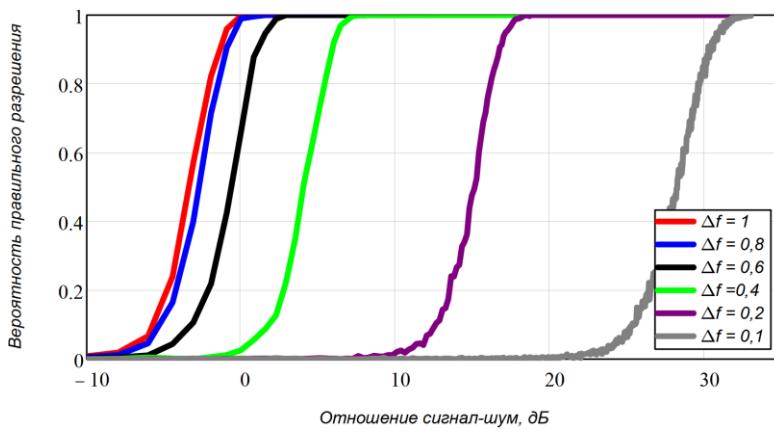


Рис. 5. Характеристики разрешения слабого детерминированного сигнала на фоне сильного, $N=10$, $L=10$

амплитуды второго сигнала увеличивается до уровня порядка 30 дБ, т.е. становится соизмеримым с амплитудой первого сигнала.

В разделе 1.4 приведены результаты экспериментальных исследований, на основе регистраций когерентно-импульсной РЛС дециметрового диапазона.

Рассмотрены случаи обнаружения БПЛА вертолетного типа (рис. 6.) и турбореактивного самолета с близкими к нулю радиальными скоростями (на развороте) на фоне горного массива (рис. 7). Проекционный метод позволил эффективно подавить эхосигналы от МП и выделить эхосигнал от цели.

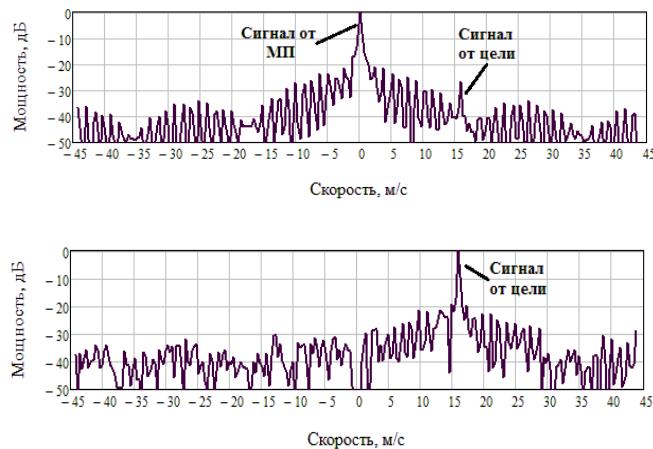


Рис. 6. Скоростная характеристика без (вверху) / с (внизу) применением проекционного метода, $N=1024$, $M=3$

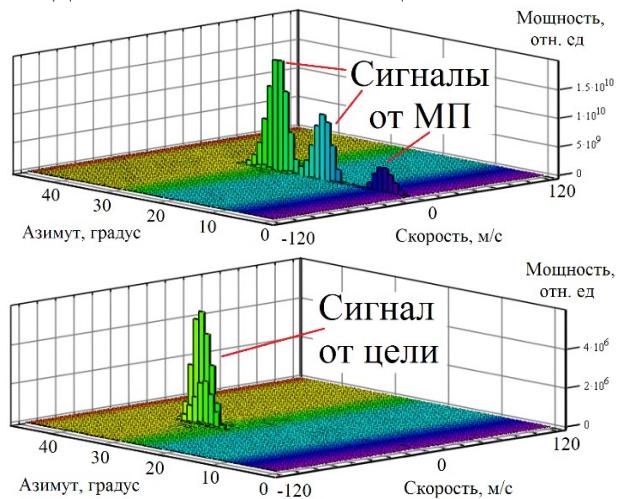


Рис. 7. Доплеровская фильтрация без (вверху) / с (внизу) применением проекционного метода, $N=256$, $M=9$

Вторая глава посвящена исследованиям, направленных на выявление модуляционных признаков вторичного излучения, обусловленных вращением винтов ЛА.

В разделе 2.1 приведены результаты исследований возможности использования методов сверхразрешения для выявления признаков пропеллерной модуляции при обнаружении ЛА с винтовым двигателем при малых ракурсных углах наблюдения. Проведен анализ методов сверхразрешения: метода MUSIC и авторегрессионного метода прямого-обратного линейного предсказания (ПОЛП)

На рис. 5 приведены характеристики разрешения слабого детерминированного сигнала на фоне сильного детерминированного сигнала для различных значений частотного разноса второго (слабого) сигнала относительно первого (40 дБ), полученные методом численного моделирования. Для достижения сверхрелеевского разрешения с величиной $\Delta f = 0,1$ значения

для обнаружения спектральных составляющих, обусловленных вращением воздушного винта ЛА. Приведены результаты натурных экспериментов по обнаружению спектральных составляющих, обусловленных вращением винта ЛА с применением MUSIC и ПОЛП. В то же время сравнение доплеровских портретов сигналов, отраженных от ЛА, не имеющих винтов, не выявило вторичную модуляцию. Показано, что предложенная методика позволяет повысить вероятность распознавания винтовых ЛА, летящих на встречных курсах при ракурсных углах близких к нулевым в среднем с 0,5 до 0,9 по сравнению с классическим алгоритмом, основанным на ДПФ. Синтезировано устройство распознавания винтовых ЛА, отличающаяся от известных применением методов сверхразрешения для выявления признаков вторичного излучения.

Раздел 2.2 посвящен исследованию метода анализа СЧ выборочной КМ сигнала для выявления признаков вторичной модуляции.

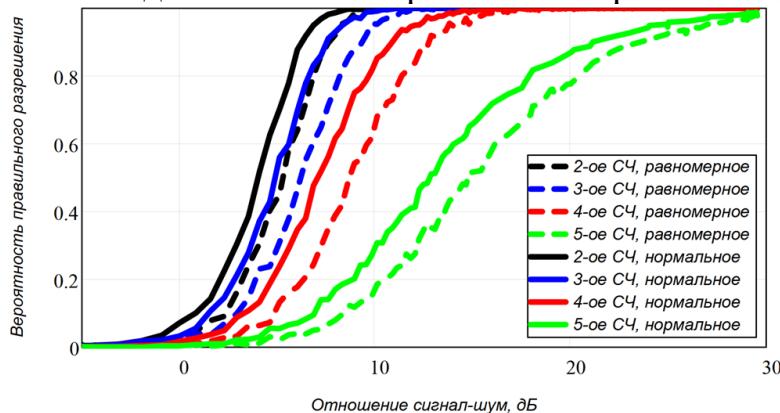


Рис. 8. Характеристики разрешения с нормальным и равномерным законом распределения флюктуаций частоты, $\sigma_f = \Delta F = 0.5$

среднем, на 1,5 дБ больше по сравнению с характеристиками сигналов с нормальным распределением флюктуаций частоты, так как гауссово распределение вероятности имеет максимальную энтропию.

Приведены результаты натурных экспериментов по оценке числа внешних источников излучения с использованием интегрального распределения максимального шумового СЧ при заданном уровне ложных тревог. В ряде случаев, как показали эксперименты, существуют сигнальные ситуации, когда в спектре эхосигнала отсутствуют ярко выраженные спектральные линии сигналов, отраженных от винтов, а наблюдается континuum спектральных линий, занимающий некоторый диапазон доплеровского сдвига частот, зависящий от максимальной скорости вращения винта и ракурса цели (рис. 9). Это характерно для ЛА, имеющих винты из композитных материалов с низкой отражательной способностью. Обнаружение таких радиолокационных сигналов с вторичной модуляцией можно представить как задачу разрешения и распознавания слабого сигнала с флюктуациями частоты на фоне сильного детерминированного сигнала на основе анализа СЧ выборочной КМ. Анализ СЧ выборочной КМ сигналов, отраженных от винтовых ЛА, позволяет выявить большее количество сигнальных СЧ, обусловленных отражением от динамических элементов конструкции цели в отличии от ЛА, которые данные элементы не имеют (рис. 10) и синтезировать

На рис. 8 приведены характеристики разрешения источников сигналов для флюктуаций частоты с нормальным и равномерным законами распределениями. Из графиков видно, что характеристики разрешения сигналов с равномерным распределением флюктуаций частоты при заданной вероятности правильного разрешения требуют ОСШ, в

алгоритм распознавания винтовых ЛА. Оценка предложенным методом числа источников внешних излучения может быть использована в качестве входных данных для методов сверхразрешения.

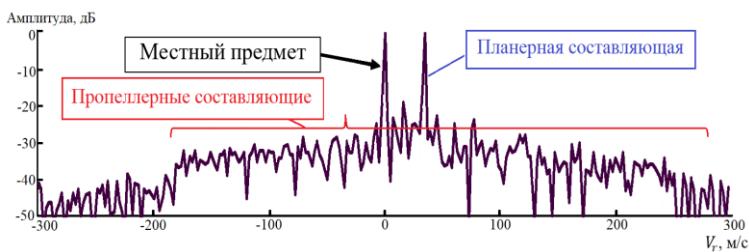


Рис. 9. Амплитудный спектр сигнала, отраженного от вертолета Robinson R 44

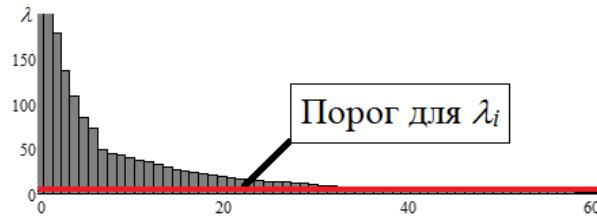


Рис. 10. СЧ выборочной КМ сигнала, отраженного от вертолета

В третьей главе проводится синтез метода селекции имитирующих радиопомех. В качестве селектирующего признака применена мера когерентности сигналов на основе вычисления энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его выборочной КМ.

В разделе 3.1 рассмотрено применение количественной меры степени когерентности сигналов на основе энтропии для разрешения близкорасположенных источников сигнала.

В разделе 3.2 оценены основные факторы, влияющие на степень когерентности, основные из которых флюктуации параметров сигнала (амплитуды, частоты, фазы), вызванных собственным шумом радиотехнической системы, флюктуации в автоколебательных системах и искажения спектра сигнала в частотно-избирательных системах. Для последнего фактора получена зависимость значения энтропия H_1 в случае увеличения ширины спектра (или уменьшению длительности) сигнала, присутствующего в выборке процесса с фиксированной длительностью N :

$$H_1(q) = \ln(q^2 NI + N) - \frac{q^2 NI + 1}{q^2 NI + N} \cdot \ln(q^2 NI + 1) \quad (5)$$

где $NI = N - n$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) длительность полезного сигнала, присутствующего в выборке процесса длительностью N , q^2 – ОСШ.

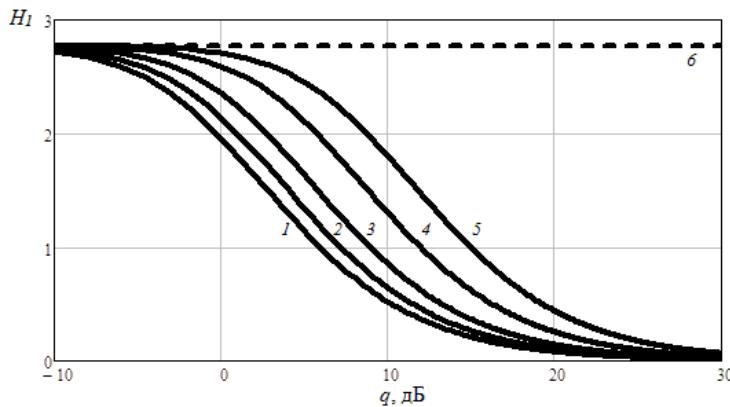


Рис. 11. Зависимость энтропии от ОСШ: 1 – $NI = N = 16$; 2 – $NI = 14$; 3 – $NI = 12$; 4 – $NI = 10$; 5 – $NI = 8$; 6 – $\ln(N)$, $N=16$

Зависимость энтропии H_1 от ОСШ для аддитивной смеси детерминированного сигнала и собственного шума различных значений NI длины полезного сигнала при фиксированном значении длины выборки процесса N приведена на рис. 11. Значения энтропии H_1 для имитирующей помехи будет совпадать со значением энтропии сигнала только при достаточно больших значениях ОСШ.

В разделе 3.3 проводится экспериментальная оценка возможности селекции имитирующих помех на основе количественной меры когерентности. Обнаруженный эффект различия значений энтропии H (степени когерентности) сигналов, отраженных от реальных ЛА различных классов и типов и ретранслятора (помехи), подтвердил возможность селекции имитирующих радиопомех (рис. 12).

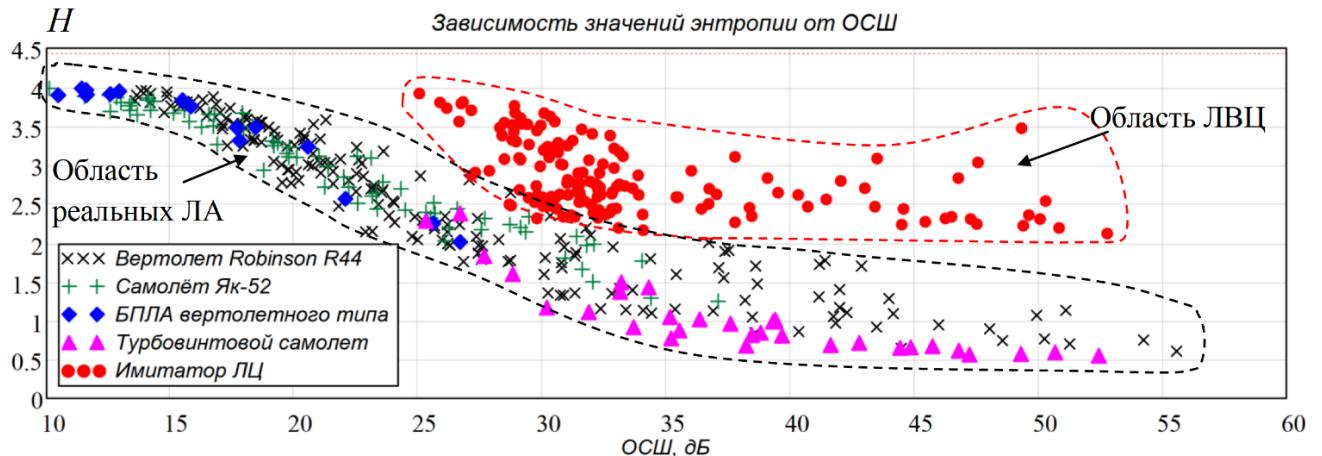


Рис. 12. Результаты натурных экспериментов по селекции имитирующих радиопомех

Анализ сигналов, отраженных от реальных ЛА и имитирующей помехи выявил высокие значения вероятности правильной селекции P_D в диапазоне от 0,9 до 0,99 (таблица), а ложные распознавания характерны, в первую очередь, для сигналов с многомодовой структурой (вторичная модуляция).

Таблица

Тип ЛА	БПЛА	Вертолет	Легкомоторный самолет	Турбореактивный самолет
P_D ,	0,95	0,90	0,93	0,99

В разделе 3.4 рассматривается селекция имитирующих помех и сигналов с постоянным уровнем частотных флюктуаций на примере сигналов с многомодовой структурой (с вторичной модуляцией). Модель имитационной помехи представлена как детерминированный сигнал с заданным доплеровским сдвигом частоты и постоянным уровнем фазовых флюктуаций, распределенных по нормальному закону. Флюктуации частоты, обусловленные отражением от винтов, задавались в виде интервала равномерного распределения ΔF от диапазона однозначного измерения доплеровского сдвига частоты. Исследование показало, что для сигнала имитационной помехи со значением СКО $\sigma_{\Delta F} = 0,25$ и более энтропия приближается к значению $\ln(N)$ и нарушается закономерная фазовая структура. В то же время сигналы с вторичной модуляцией сохраняют когерентную структуру для наиболее часто встречающихся на практике случаев.

В разделе 3.5 приведена оценка вычислительных затрат предлагаемого метода.

В разделе 3.6 проводится синтез алгоритма селекции ложных целей с использованием количественной меры когерентности сигналов на основе вычисления энтропии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Показано, что проекционный метод доплеровской фильтрации превосходит по своим характеристикам известные квазиоптимальные методы межпериодной фильтрации полезного сигнала на фоне собственного шума и ПП. Показана возможность синтеза групп фильтров с различными зонами режекции, обеспечивающих обнаружение ЛА в заданном диапазоне радиальных скоростей.
2. Проведён анализ статистических характеристик разрешения и распознавания полезного сигнала при малых ОСШ при наличии одного мощного источника сигнала-помехи на основе анализа СЧ выборочной КМ и показана возможность разрешения и распознавания слабого сигнала на фоне сильного детерминированного сигнала с частотными интервалами, меньшими релеевского интервала разрешения.
3. Приведены результаты натурных экспериментов и показана работоспособность проекционного метода по обнаружению малоскоростных ЛА в сложной сигнально-помеховой обстановке (на фоне протяженных МП) с минимальными потерями в ОСШ.
4. Приведены результаты численного моделирования и натурных экспериментов, оценивающие возможности применения методов сверхразрешения для выявления признаков вторичной модуляции при обнаружении ЛА с винтовым двигателем при малых ракурсных углах наблюдения. Предложено и запатентовано устройство распознавания винтовых ЛА, отличающаяся от известных применением методов сверхразрешения для выявления признаков вторичного излучения.
5. Проведено сравнение доплеровских портретов сигналов, отраженных от различных типов ЛА: винтовых и реактивных. Показано, что предложенная методика позволяет повысить вероятность распознавания винтовых ЛА, летящих на встречных курсах при ракурсных углах близких к нулевым в среднем с 50% до 90% по сравнению с классическим алгоритмом, основанным на ДПФ.
6. Проведён анализ статистических характеристик разрешения источников сигналов с частотными флуктуациями при малых ОСШ при наличии одного мощного источника сигнала-помехи на основе анализа СЧ выборочной КМ. Показано, что характеристики разрешения сигналов с равномерным распределением флуктуаций частоты при заданной вероятности правильного разрешения имеют ОСШ, в среднем, на 1,5 дБ больше по сравнению с характеристиками сигналов с нормальным распределением флуктуаций частоты.
7. Предложенный в работе метод, основанный на анализе СЧ выборочной КМ, позволяет повысить эффективность распознавания радиолокационных сигналов, отраженных от винтовых ЛА. Кроме того, экспериментально показана возможность использования предложенного метода для классификации типа винтового ЛА по скорости несущих винтов.
8. Исследован метод защиты от интеллектуальных имитирующих активных помех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. В качестве селектирующего признака предложена мера когерентности сигналов как энтропия H распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его выборочной КМ \widehat{M} .

9. Приведены результаты натурных экспериментальных исследований с использованием различных типов ЛА (с винтовым двигателем и турбореактивных) и специализированной аппаратуры - ретранслятора имитирующих радиопомех. Полученный в ходе экспериментальных исследований эффект различия степени когерентности сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов, и сигнала помехи, подтверждён численным моделированием и позволяет провести селекцию активной имитирующей радиопомехи.
10. Предложена методика оценки количественной меры степени когерентности сигналов и анализ вычислительных затрат. Предложено и запатентовано устройство защиты от интеллектуальных радиопомех, отличающаяся от известных применением количественной меры когерентности в виде энтропия H распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его выборочной КМ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Научные статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. **Козлов С.А.**, Фитасов Е.С., Василенко Е.В., Насонов В.В. Повышение эффективности автокомпенсации шумовых активных помех в радиолокационных станциях малой дальности // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2013, № 1. – С.45–48.

2. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.**, Алексеев Д.Ю., Пугин Д.С. К вопросу повышения эффективности классификации винтовых летательных аппаратов в РЛС дециметрового диапазона // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. - 2016. №3 (93). – С. 66–71.

3. Орлов И.Я., Фитасов Е.С., Ивлев Д.Н., **Козлов С.А.** Оценка когерентности радиолокационных сигналов в антенных решетках на основе анализа распределений энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы // Антенны. – 2017, №3. – С.31-36.

4. Орлов И.Я., Фитасов Е.С., Ивлев Д.Н., **Козлов С.А.**, Королев А.Г. Оценка влияния интерференции радиоволн в антенных решетках при приеме радиосигналов под малыми углами места в L, S и X частотных диапазонах // Антенны. – 2017, №11. – С.25-30.

5. Фитасов Е.С., Леговцова Е.В., **Козлов С.А.**, Насонов В.В. Система защиты импульсной радиолокационной системы от дискретных метеобразований // Датчики и системы. – 2017, №8-9. – С. 13-19.

6. Фитасов Е.С., Насонов В.В., Гусева Ю.С., **Козлов С.А.** К вопросу оценки эффективности работы автокомпенсатора активных шумовых помех при пространственном перемещении помехопостановщика // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2019, №2(34). – С. 21-30.

7. Фитасов Е.С., Орлов И.Я., Насонов В.В., Бессонова Е.В., **Козлов С.А.** Квазиоптимальный проекционный метод доплеровской фильтрации

радиолокационных сигналов // Известия вузов. Радиофизика. – 2019, Т. 62, № 6. – С. 460–468 (WoS, Scopus).

8. Фитасов Е.С., Леговцова Е.В., Пальгуев Д.А., **Козлов С.А.**, [и др.] Экспериментальная оценка проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов при обнаружении воздушных объектов с малыми радиальными скоростями // Известия вузов. Радиофизика. – 2021, Т. 64, № 4. С. 331–340 (WoS, Scopus).

9. Фитасов Е.С., Леговцова Е.В., Кудряшова О.Е., **Козлов С.А.**, Насонов В.В. Селекция имитирующих сигналоподобных помех в радиолокационных системах с внутренней когерентностью // Известия вузов. Радиофизика. – 2021, Т. 64, № 11. – С. 917-925 (WoS, Scopus).

10. **Козлов С.А.**, Кудряшова О.Е., Фитасов Е.С., Тимофеев А.Е., Ильясафов А.Д. Экспериментальные исследования распознавания радиолокационных сигналов с пропеллерной модуляцией на основе анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы // Известия вузов. Радиофизика. – 2025, Т. 68, № 10. – С. 858-869 (WoS, Scopus).

Научные статьи в журналах, включенных в РИНЦ и доклады в материалах научных конференций

1. Горячкина О.Е., **Козлов С.А.**, Фитасов Е.С. Анализ влияния пропеллерной модуляции на обнаружение винтовых летательных аппаратов в РЛС дециметрового диапазона // Труды XIV -й научной конф. по радиофизике. 7 мая 2010 г. / Ред. С.М. Грач, А.В. Якимов. – Н. Новгород: ННГУ, 2010. – С. 138-139.

2. **Козлов С.А.**, Фитасов Е.С. Исследование возможности использования методов сверхразрешения для классификации винтовых летательных аппаратов // В сб.: Докл. XVII -й научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь». 12-14 апр. 2011 г. – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕ», 2011. – Т.3. – С.2041-2049.

3. **Козлов С.А.**, Фитасов Е.С. Синтез системы классификации летательных аппаратов класса «Самолет с винтовым двигателем» // Труды XV научной конференции по радиофизике. 10-13 мая 2011 г. / Ред. С.М. Грач, А.В. Якимов. – Н. Новгород: ННГУ, 2011. – С. 118-119.

4. Василенко Е.В., **Козлов С.А.**, Фитасов Е.С. Экспериментальные исследования системы автокомпенсации шумовых активных помех на основе метода линейной интерполяции коэффициентов настройки // Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова (Н. Новгород, 11-18 мая 2012 г.) /Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Н. Новгород: ННГУ, 2012. – С. 120-121.

5. Шамшин М.О., **Козлов С.А.** Исследование эффективности метода адаптивного порога обнаружения на основе порядковой статистики // Труды XVII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения В.С. Троицкого (Н. Новгород, 13-17 мая 2013 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Н. Новгород: ННГУ, 2013. – С.141-143.

6. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.** К вопросу повышения качества информационного обеспечения малогабаритных РЛС обнаружения низколетящих

целей // XV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и др. стран мира, сравнительный анализ», 2-3 октября 2014 г.: сб. докл.; секции 6-9 / ВКА имени А.Ф. Можайского (филиал, г. Ярославль). – Ярославль, 2014. – С.145-152.

7. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.**, Хмылов Е.С., Насонов В.В. Синтез алгоритма обнаружения винтовых летательных аппаратов в дециметровых РЛС с применением методов сверхразрешения // XV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и др. стран мира, сравнительный анализ», 2-3 октября 2014 г.: сб. докл.; секции 6-9 / ВКА имени А.Ф. Можайского (филиал, г. Ярославль). – Ярославль, 2014. – С.152-161.

8. Фитасов Е.С., Леговцова Е.В., **Козлов С.А.**, Сорокина А.В. Оценка эффективности системы селекции движущихся целей на основе проекционного метода в РЛС малой дальности дециметрового диапазона на фоне интенсивных отражений от протяженных местных предметов // Труды XIX научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 70-летию радиофизического факультета. г. Н. Новгород, 2015. – С. 149-150.

9. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.**, Леговцова Е.В., Насонов В.В. Сравнительный анализ малогабаритных (переносных) РЛС обнаружения воздушных целей // XVI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и других стран мира, сравнительный анализ», 2 октября 2015 г.: сб. докл.; секции 1-6 / Ярославское высшее военное училище ПВО. – Ярославль, 2015. – С. 499-505.

10. Евсеев А.П., **Козлов С.А.**, Пучков А.В. Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решетки // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика / Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова. Н. Новгород: ННГУ, 2016. – С. 144-145.

11. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.**, Сорокина А.В., Жарков Ю.А., Насонов В.В. Экспериментальные исследования возможности распознавания ложных целей на основе оценки когерентности радиолокационных сигналов // Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика / Под ред. С.В. Оболенского, В.В. Матросова. Нижний Новгород: ННГУ, 2016. – С. 138-139.

12. Фитасов Е.С., **Козлов С.А.**, Леговцова Е.В., Макарова Ю.М. К вопросу селекции имитирующих помех на основе оценки степени когерентности радиосигналов // Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2017 : Материалы 12-ой международной научно-технической конференции, в 2-х томах, Сузdalь, 05–07 июля 2017 года. Том 1. – Сузdalь: Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2017. – С. 98-101.

13. Фитасов Е.С., Насонов В.В., **Козлов С.А.** К вопросу оценки вычислительных затрат метода селекции интеллектуальных имитирующих

сигналоподобных помех // Вестник ЯВВУ ПВО: научный журнал. Ярославль. – 2017, №1. – С. 109–114.

14. Евсеев А.П., **Козлов С.А.**, Пучков А.В., Орлов И.Я. Альтернативный подход к созданию «сверхразрешающей» цифровой антенной решетки // Труды XXIII международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии - ИСТ-2017», посвящённой 100-летию НГТУ – Нижегородского политехнического института (Н. Новгород, 21 апреля 2017 г.). – С. 87-90.

15. **Козлов С.А.**, Цыганов В.В. Сравнительный анализ методов режекции и максимального правдоподобия при измерении малых углов места радиолокационных целей // Труды XXV научной конференции по радиофизике, (Н. Новгород, 14-26 мая 2021 г.) Н. Новгород: ННГУ, 2021. – С. 221-223.

16. **Козлов С.А.**, Горев С.А. Исследование спектров сигналов от винтомоторных летательных аппаратов, полученных методами сверхразрешения // Труды XXV научной конференции по радиофизике, (Н. Новгород, 14-26 мая 2021 г.) Н. Новгород: ННГУ, 2021. – С. 255-257.

17. **Козлов С.А.** Исследование проекционного метода режекции земного луча при обнаружении низколетящих воздушных целей // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой, (Н. Новгород, 12—27 мая 2022 г.). Н. Новгород: ННГУ, 2022. – С. 280-283.

18. Васильев Д.А., **Козлов С.А.**, Леговцова Е.В., Фитасов Е.С. Экспериментальные исследования проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов при обнаружении воздушных объектов с малыми радиальными скоростями // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б. Я. Осипова, Воронеж, 27–29 сентября 2022 года. Том 3. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – С. 304-311.

19. **Козлов С.А.**, Куряшова О.Е., Леговцова Е.В., Фитасов Е.С. Селекция ложных целей в РЛС с внутренней когерентностью // Радиолокация: Теория и практика. – Москва: ООО Издательство "Юнити-Дана", 2023. – С. 497-511.

Патенты на изобретения и полезные модели

1. Патент на полезную модель № 157396 Рос. Федерация, МПК G01S 13/52. Устройство распознавания винтовых летательных аппаратов: № 2015135160/07: заявл. 19.08.2015: опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34 / Е.С. Фитасов, С.А. **Козлов**; заявитель АО «ФНПЦ «ННИИРТ».

2. Патент на полезную модель № 184465 Рос. Федерация, МПК G01S 13/52. Устройство селекции ложных целей: № 2018126557: заявл. 18.07.2018: опубл. 26.10.2018 / Е.С. Фитасов, С.А. **Козлов**; заявитель АО «ФНПЦ «ННИИРТ».

3. Патент № 2807614 Рос. Федерация, МПК G01S 7/36. Способ формирования весового коэффициента в условиях нестационарности помеховой обстановки: № 2022128263: заявл. 28.10.2022: опубл. 17.11.2023, Бюл. № 32 / В. В. Насонов, Е.С. Фитасов, С.А. **Козлов** [и др.]; заявитель ФГКВОУВО "Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны" МО РФ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ
ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДА ДОПЛЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С МАЛЫМИ РАДИАЛЬНЫМИ СКОРОСТЯМИ
1.1 Проекционный метод доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов
1.2 Оценка эффективности проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов
1.3 Характеристики обнаружения и распознавания слабого сигнала на фоне сильного детерминированного сигнала с частотами меньшими интервала релеевского разрешения
1.4 Результаты натурных экспериментов
1.5 Выводы по главе 1
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ СО ВТОРИЧНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ ВЫБОРОЧНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МАТРИЦЫ
2.1 Экспериментальные исследования методов спектрального сверхразрешения для выявления признаков вторичной модуляции
2.2 Экспериментальные исследования метода анализа собственных чисел выборочной корреляционной матрицы сигнала для выявления признаков вторичной модуляции
2.3 Выводы по главе 2
ГЛАВА 3 МЕТОД СЕЛЕКЦИИ ИМИТИРУЮЩИХ ПОМЕХ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ВНУТРЕННЕЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ
3.1 Количественная мера степени когерентности сигналов в виде энтропии распределения сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы
3.2 Основные факторы, влияющие на степень когерентности радиолокационных сигналов
3.3 Экспериментальная оценка возможности селекции имитирующих помех на основе оценки распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы
3.4 Селекция имитирующих помех и сигналов с постоянным уровнем частотных флуктуаций на примере сигналов с вторичной модуляцией
3.5 Методика оценки количественной меры степени когерентности сигналов и анализ вычислительных затрат
3.6 Синтез устройства селекции ложных целей
3.7 Выводы по главе 3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Козлов Сергей Александрович

**Временная обработка сигналов, отраженных от малоразмерных и
малоскоростных объектов в присутствии помех**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____ г. Заказ №_____

Формат _____. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100.

Типография_____