



Леговцова Елена Витальевна

**Исследование когерентности сигналов и помех в импульсных
радиолокационных системах**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена на кафедре радиотехники в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. 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 управляющие 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 Есипенко Валентин Иванович доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры "Электроника и сети ЭВМ" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ), г. Н. Новгород
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»), г. Йошкар-Ола

Защита состоится 02 апреля 2025 г. в 15 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/1506>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.340.03.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03,
д. ф.-м. н., профессор

А.В. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и степень разработанности темы

Одной из важнейших задач современных радиотехнических систем (радио- и гидролокация, навигация, связь и т.д.) является обнаружение полезного сигнала на фоне интенсивных помех различного происхождения.

Развитие информационных технологий, микропроцессорной техники, миниатюризация элементной базы позволяет создавать радиотехническим системам сложную помеховую обстановку из комплекса активных помех: заградительных, прицельных, имитирующих (шумовых, импульсных, сигналоподобных помех).

Защита радиотехнических систем от активных шумовых помех (АШП) является крайне актуальной задачей, так как помехи данного вида приводят к наиболее существенному нарушению их функционирования. Под активными шумовыми помехами понимают такие помехи, которые создаются путем шумовой модуляции колебаний генератора помех, причем может применяться как амплитудная, так и частотная модуляция, или оба вида модуляции одновременно. При этом, шумовую помеху можно представить как флуктуационный процесс – колебания со случайными амплитудой и фазой (частотой) или как результат случайного наложения (суммы) детерминированных сигналов. Результатом воздействия АШП, например, на радиолокационную систему, является необнаружение эхо-сигналов, отраженных от воздушных объектов, и существенное увеличение уровня ложных тревог. При этом, существующие классические способы защиты от шумовых помех не всегда эффективны, так как практически в большинстве случаев после их применения на выходе системы обработки появляются некомпенсированные остатки от помех, что также приводит к появлению ложных тревог на выходе обнаружителя.

Известно, что одним из главных факторов, существенно снижающих эффективность систем защиты от активных шумовых помех в антенной решетке, является нарушение пространственной когерентности помехи или декорреляция приемных каналов. При этом, существуют сложные ситуации, когда без точного (количественного) критерия оценка когерентных свойств сигнала становится весьма проблематичной.

Задачу обнаружения и оценку параметров сигнала на фоне пассивных помех (мешающих отражений от подстилающей поверхности, дискретных местных предметов, гидрометеорообразований, «ангелов», организованных дипольных помех) в радиолокационных станциях решает система селекции движущихся целей (СДЦ). В общем случае, пассивную помеху можно представить как колебания с флуктуациями частоты Доплера f , распределенными по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_f относительно частоты Доплера f .

Известно, что спектр пассивной помехи представляет сумму энергетических спектров отдельных отражателей и имеет такую же форму, что и спектр одиночного отражателя. Случайное движение элементарных отражателей приводит к расширению спектра, пропорциональному дисперсии скоростей элементарных

отражателей. Расширение спектра происходит также за счет сканирования диаграммы направленности антенны РЛС.

Кроме того, на ширину спектра (его расширение) влияют следующие факторы: а) взаимное хаотическое перемещение отражателей в импульсном объеме под действием ветра, что приводит к межпериодному случайному изменению амплитуды и фазы помехи и, следовательно, расширению ее спектра; б) амплитудные и фазовые флуктуации помехи, что обусловлено обновлением части отражателей от периода к периоду следования при вращении антенны; в) нестабильности параметров РЛС (частоты, амплитуды, длительности и периода следования зондирующего сигнала, частоты местного и когерентного гетеродинов приемника, коэффициента усиления приемника, параметров системы межпериодной обработки пачки), которые вызывают дополнительные амплитудные и фазовые флуктуации помехи. Таким образом, все указанные факторы влияют на когерентность излучаемых и отраженных радиолокационных сигналов. Кроме того, в зависимости от когерентных свойств принимаемой пачки импульсов могут применяться различные методы обработки, например, когерентное или некогерентное накопление пачки отраженных импульсов.

В алгоритмическом плане фильтр для режекции пассивной помехи идентичен автокомпенсатору активной внешней помехи. Различие между этими устройствами состоит только в используемом виде когерентности помех: при режекции пассивной помехи используется её **временная когерентность**, а при автокомпенсации активной помехи – **пространственная когерентность**.

Таким образом, при синтезе систем защиты от помех современных импульсных РЛС с внутренней когерентностью и повышения качества помехозащищенности становится **актуальной** задача оценки когерентности радиолокационных сигналов и помех, поступающих на вход радиолокационной системы.

Кроме рассмотренных выше радиолокационных систем, существует целый ряд радиофизических задач, в которых также требуется оценка когерентности принимаемого радиосигнала или когерентности самой радиоприемной системы. Данные задачи могут возникать в различных областях радиофизики – связи, электроники (физики полупроводников), навигации и др. Например, оценка когерентности сигналов может использоваться при анализе флуктуаций в автоколебательных системах, при исследовании шумов в наноразмерных структурах и др.

В радиотехнических задачах понятие «когерентность» характеризует связь элементов одного и того же сигнала, определяя, тем самым, «жесткость» его структуры. Когерентным является сигнал с закономерной фазовой структурой, то есть детерминированный сигнал, а некогерентным - шум (стохастический сигнал) или смесь детерминированного сигнала с шумом.

При этом, существуют сложные сигнально-помеховые ситуации, когда без точного (количественного) критерия оценка когерентных свойств сигнала становится весьма проблематичной, например, в случае флуктуаций параметров сигнала (амплитуды, частоты, фазы). Спектрально-корреляционная теория в рамках статистической радиотехники дает достаточно исчерпывающий анализ случайных

процессов: смеси детерминированного сигнала и шума, их характеристики, флуктуаций параметров сигнала, различные частные случаи и т.д. Однако используемый для оценки когерентности сигналов корреляционный анализ и его математический аппарат достаточно сложен, что в практических инженерных приложениях вызывает существенные затруднения. Поэтому задача получения количественной и информативно ёмкой оценки степени когерентности сигналов является достаточно актуальной для целого ряда радиофизических приложений.

В большинстве практических задач при оценке когерентности сигналов и помех в радиоприемных устройствах необходим учет флуктуационных процессов. Поэтому, как с теоретической, так и с практической точки зрения представляет интерес задача анализа степени когерентности сигналов с флуктуациями параметров (частоты, фазы).

Таким образом, становятся **актуальными** задачи исследования когерентных свойств радиолокационных сигналов и помех, а также синтеза алгоритмов пространственно-временной обработки, требующих учет когерентных свойств радиолокационных сигналов и помех, поступающих на вход радиолокационной системы.

Целью данной работы является исследование когерентных свойств радиолокационных сигналов и помех для повышения эффективности пространственно-временной обработки импульсных радиолокационных систем.

Задачи работы:

1. Провести анализ степени когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров.
2. Провести анализ степени когерентности активных шумовых помех с учётом влияния ширины частотного диапазона, влияния нестационарности помеховой обстановки и влияния времени воздействия активной шумовой помехи.
3. Провести анализ когерентности радиолокационных сигналов, отраженных от источников пассивных помех с учетом их спектральных свойств.
4. Обосновать преимущества использования интерполяции коэффициентов настройки автокомпенсатора шумовой активной помехи с непосредственным обращением корреляционной матрицы помехи в условиях нестационарной помеховой обстановки.
5. Синтезировать и провести оценку когерентных свойств системы селекции движущихся целей на основе проекционного метода межпериодной обработки полностью когерентной пачки импульсов.

Научная новизна полученных результатов:

1. Предложен новый метод оценки степени когерентности сигналов с флуктуациями параметров (амплитуды, частоты, фазы) на основе оценки энтропии в виде распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы. В отличие от существующих методов, оценка когерентности позволяет давать количественную оценку процессов с различным уровнем и видом флуктуаций (амплитудных, фазовых, частотных).
2. Предложен новый метод оценки степени когерентности активных шумовых помех в импульсных радиолокационных системах на основе оценки энтропии в виде распределения энергии сигнала по собственным числам

корреляционной матрицы. В отличие от существующих методов позволяет придать спектральным свойствам (узкополосная, широкополосная) активных помех количественную оценку.

3. Предложен новый метод оценки степени когерентности пассивных помех в импульсных радиолокационных системах на основе оценки энтропии в виде распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы. Впервые обоснована возможность использования меры когерентности для качественной оценки максимальной подпомеховой видимости и максимального коэффициента подавления пассивной помехи.

4. Впервые обоснована возможность использования проекционного метода квазиоптимальной межпериодной временной обработки пачки импульсов на фоне пассивной помехи с заданными корреляционными свойствами для синтеза системы селекции движущихся целей импульсной РЛС с учетом степени когерентности принимаемого сигнала.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Теоретически обосновано использование энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы для количественной оценки степени когерентности сигналов с фазо-частотными флуктуациями. Это позволяет использовать оценку степени когерентности для решения задач, в которых требуется анализ параметров сигналов при прохождении (распространении) в среде или через различные радиотехнические системы – в радиолокационных системах, в радиофизических измерительных системах, в задачах исследования электромагнитной обстановки, в задачах обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, в системах радионавигации и радиосвязи.

2. Предложенные методики оценки степени когерентности сигналов и помех могут быть использованы при проектировании систем пространственно-временной обработки сигналов современных радиолокационных систем.

3. Запатентованный способ селекции движущихся целей позволил обеспечить характеристики обнаружения воздушных объектов на фоне пассивных помех в радиолокационных станциях L-диапазона.

4. Запатентованный способ формирования весового коэффициента автокомпенсатора позволил компенсировать активную шумовую помеху при работе в условиях нестационарной помеховой обстановки, связанной со сканированием диаграммы направленности антенны РЛС, или перемещения в пространстве помехопостановщика за период обзора.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач применялись методы статистической радиофизики, математического моделирования, математической статистики и теории вероятностей. Исследования проводились с использованием имитационного компьютерного моделирования.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается строгостью применяемого математического аппарата. Обоснованность большинства результатов работы следует из получаемых точных

соотношений в рамках рассматриваемых моделей и их стыковки с ранее известными результатами, а в случае приближенных расчетов подтверждаются результатами численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученные математические модели когерентности в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы позволяют дать количественную оценку когерентных, частично когерентных и некогерентных процессов при амплитудных, частотных и фазовых флуктуациях.

2. Полученная оценка степени когерентности в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы позволяет дать когерентным свойствам активных шумовых помех количественную оценку, в том числе дать количественную оценку широкополосной и узкополосной активной шумовой помехи.

3. Полученная оценка степени когерентности в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы позволяет дать когерентным свойствам пассивных помех количественную оценку, в том числе позволяет дать оценку максимального коэффициента подавления пассивной помехи и качественную оценку максимальной подпомеховой видимости в системе селекции движущихся целей импульсных РЛС.

4. Полученная оценка степени когерентности в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы позволяет обосновать использование квазиоптимального проекционного метода доплеровской фильтрации при синтезе системы селекции движущихся целей когерентной импульсной РЛС.

Апробация результатов

Основные положения, выводы и результаты исследования были представлены и обсуждены на научных конференциях: на международных конференциях: на 12-й международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (г. Владимир, 2017), на 14-й международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (г. Владимир, 2021), на XXVIII-й конференции "Радиолокация, навигация, связь RLNC*2022" (г. Воронеж, 2022); на всероссийских конференциях: на IV-й научно-технической конференции «Радиолокация. Теория и практика» (г. Н. Новгород, 2022); на региональных конференциях: на XIV-й, XV-й, XVI-й, XIX-й, XXIV-й, XXV-й, XXVI-й, XXVII-й научных конференциях по радиофизике (г. Н. Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010, 2011, 2012, 2015, 2020, 2021, 2022, 2023).

Публикации

По теме диссертации автором опубликованы 25 работ: 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 6 по специальности 1.3.4 - Радиофизика; 5 статей в ведущих изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus); 2 патента РФ на изобретение; 1 статья в региональном научном издании; 4

статьи и тезиса докладов в сборниках трудов международных научных конференций;

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, выполнены при непосредственном активном участии соискателя либо получены им лично. В большинстве совместных работ автором выполнены аналитические расчеты и компьютерное моделирование. Постановка задач, разработка подходов выполнены совместно с научным руководителем, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с авторами научных работ, опубликованных соискателем.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель и задачи, указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приводятся положения, выносимые на защиту, описана структура и приведено краткое содержание диссертации. Введение содержит сведения о достоверности и апробации результатов.

Первая глава посвящена анализу степени когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров. (амплитуды, частоты, фазы) на основе оценки энтропии в виде распределения энергии сигнала по собственным числам выборочной корреляционной матрицы. Анализ проводится для случая, когда флуктуации представляют собой медленный нормально распределенный стационарный процесс.

В **разделе 1.1** рассматривается математическая модель оценки степени когерентности сигналов с флуктуациями параметров на примере радиолокационных сигналов, принимаемых радиолокационной системой на фоне собственного шума. В качестве количественной меры степени когерентности используется энтропия распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Применение данной меры для оценки когерентных свойств сигналов имеет ряд существенных достоинств по сравнению с известными методами: инвариантность относительно формы сигнала; универсальность оценки как для временной, так и для пространственной когерентности; оценка может быть реализована на основе выборочной корреляционной матрицы сигнала.

Показатель энтропии равен:

$$H = - \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \ln(\lambda_{0i}), \quad (1)$$

где $\lambda_{0i} = \frac{\lambda_i}{\text{Sp } \Phi}$ - нормированные собственные значения матрицы Φ ; $\text{Sp } \Phi$ – след (сумма диагональных элементов) матрицы Φ .

$$\Phi = \mathbf{R} + \mathbf{I},$$

где $\mathbf{R} = \langle \mathbf{X}\mathbf{X}^* \rangle$ - корреляционная матрица (КМ) принимаемого детерминированного сигнала, $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

В случае детерминированного сигнала КМ имеет единичный ранг, а её

нормированные собственные значения удовлетворяют равенствам $\lambda_{01} = 1$, $\lambda_{02} = \dots = \lambda_{0N} = 0$. При этом энтропия H имеет минимально возможное нулевое значение, то есть детерминированный сигнал является полностью когерентным. Нормированные собственные значения удовлетворяют при этом соотношениям $\lambda_{01} = \dots = \lambda_{0N} = \frac{1}{N}$, а энтропия распределения энергии сигнала равна $H = \ln(N)$.

Более сложной для анализа является задача оценки степени когерентности сигналов с флуктуациями фазы и частоты (производной от фазы).

В данном случае, входной сигнал можно представить как сумму произвольного числа M внешних источников некоррелированных сигналов с линейно независимыми векторами $\mathbf{X}_1 \dots \mathbf{X}_M$ и корреляционная матрица Φ будет иметь вид:

$$\Phi = \mathbf{I} + \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_1^* + \mathbf{X}_2 \mathbf{X}_2^* + \dots + \mathbf{X}_M \mathbf{X}_M^*.$$

При этом КМ Φ будет иметь M отличных от единицы нормированных собственных значений $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03} \dots \lambda_{0M}$, $\lambda_{0(M+1)} = \dots = 1$.

Таким образом, значение энтропии квазидетерминированного сигнала с флуктуациями параметров можно представить следующим образом

$$H_1 = - \left[\sum_{i=1}^M \lambda_{0i} \ln(\lambda_{0i}) + \sum_{i=M+1}^N \lambda_{0i} \ln(\lambda_{0i}) \right]. \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что при увеличении отношения сигнал/шум минимальное значение энтропии будет стремиться не к нулю, как в случае детерминированного сигнала, а к значению

$$H_1^{\min} = - \sum_{i=1}^M \lambda_{0i} \ln(\lambda_{0i}), \quad (3)$$

которое будет определяться значениями M отличных от нуля собственных чисел корреляционной матрицы помехи Φ .

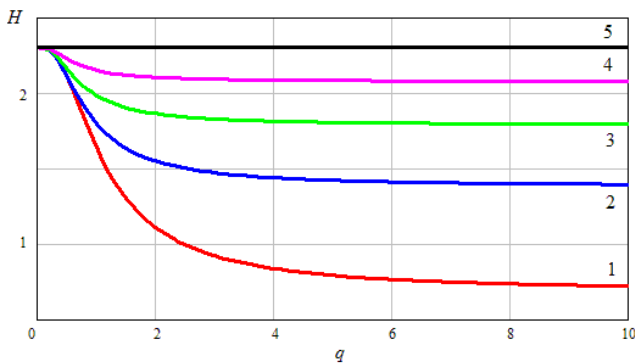


Рис. 1. Зависимость значений энтропии от ОСШ суммы M некоррелированных сигналов с линейно независимыми ортогональными векторами $\mathbf{X}_1 \dots \mathbf{X}_M$

Из анализа рис. 1 видно, что энтропия распределения энергии сигнала монотонно уменьшается, достигая своего минимального значения $H = \ln M$. Кривая 1 – $M = 2$; кривая 2 – $M = 4$; кривая 3 – $M = 6$; кривая 4 – $M = 8$; кривая 5 – $M = 10$. Приведенная выше модель показывает лишь предельные случаи ортогональных сигналов и качественное поведение оценки энтропии процесса.

В разделе 1.2 проводится оценка когерентности сигналов с флуктуациями фазы. В данном случае модель входного процесса имеет вид:

$$\mathbf{X}_\phi = (e^{-j(fT+\phi_1)}, e^{-j(2fT+\phi_2)}, \dots, e^{-j(NfT+\phi_N)})^*, \quad (4)$$

где $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ – случайные фазы, распределенные по нормальному закону со

среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_φ .

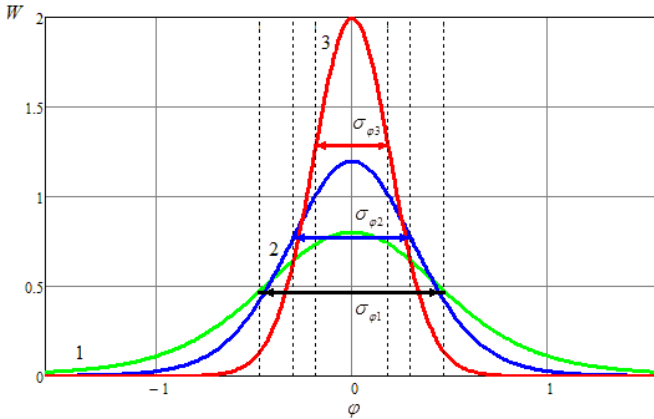


Рис. 2. Распределение фазы аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала и собственного шума при ОСШ 1 - $q_1=2$; 2 - $q_2=3$; 3 - $q_3=5$; СКО фазы $\sigma_{\varphi 1}=D(q_1)^{0.5}$; $\sigma_{\varphi 2}=D(q_2)^{0.5}$; $\sigma_{\varphi 3}=D(q_3)^{0.5}$

При некотором фиксированном значении среднеквадратического отклонения случайной фазы $\sigma_\varphi = D(q)^{0.5}$ распределение фазы будет соответствовать конкретному значению ОСШ (рис. 2). Таким образом, значение энтропии (3) $H_1^{\min}(q)$ квазидетерминированного сигнала с флуктуациями фазы, распределенного по нормальному закону, с СКО σ_φ

при ОСШ $q \rightarrow \infty$, будет стремиться к значению энтропии при некотором фиксированном значении q_0 :

$$H_1^{\min}(q) = H(q_0). \quad (5)$$

На рис. 3 показаны результаты математического моделирования оценки энтропии аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала со случайной фазой, распределенного по нормальному закону, и гауссового шума (кривые 1,2,3).

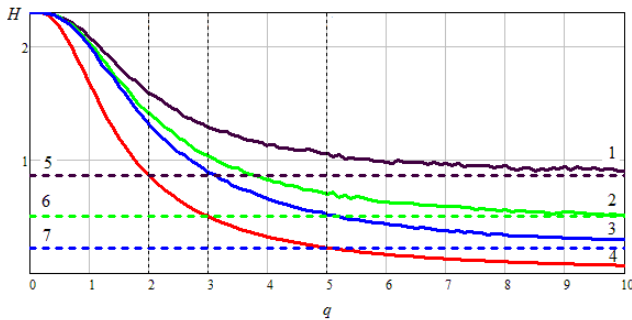


Рис. 3. Оценка энтропии аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала со случайной фазой, распределенного по нормальному закону с СКО $\sigma_{\varphi 1}, \sigma_{\varphi 2}, \sigma_{\varphi 3}$, и гауссового шума

Длина выборки процесса $N=10$. Значения $\sigma_{\varphi 1}, \sigma_{\varphi 2}, \sigma_{\varphi 3}$, соответствуют СКО распределения фазы при значениях ОСШ $q_1=2, q_2=3, q_3=5$ (рис. 1.4). Кривая 4 соответствует аддитивной смеси детерминированного сигнала без фазовых флуктуаций и гауссового шума. Прямые 5, 6, 7 соответствуют значению $H_1^{\min}(q) = H(q_0)$, к которому энтропия

квазидетерминированного сигнала со случайной фазой при ОСШ $q \rightarrow \infty$.

В разделе 1.3 проводится анализ когерентных свойств радиолокационных сигналов при флуктуациях частоты. Модель входного процесса будет иметь вид:

$$\mathbf{X}_\phi = (e^{-j((f+f_1)T)}, e^{-j(2(f+f_2)T)}, \dots, e^{-j(N(f+f_N)T)})^*, \quad (6)$$

где $f_1, f_2, \dots, f_N$ – случайные частоты, распределенные по нормальному закону с СКО σ_f .

Оценка энтропии процесса с флуктуациями частоты, аналогично оценке энтропии процесса с флуктуациями фазы в соответствии с выражением (5), будет стремиться к значению $H_1^{\min}(q) = H(q_0)$. При этом значения ОСШ q_{0n} будут определяться из выражения

$$2 \cdot m(\Delta f = 1, q_{0n}) = \frac{n \cdot \Delta f}{\sqrt{2\pi}}. \quad (7)$$

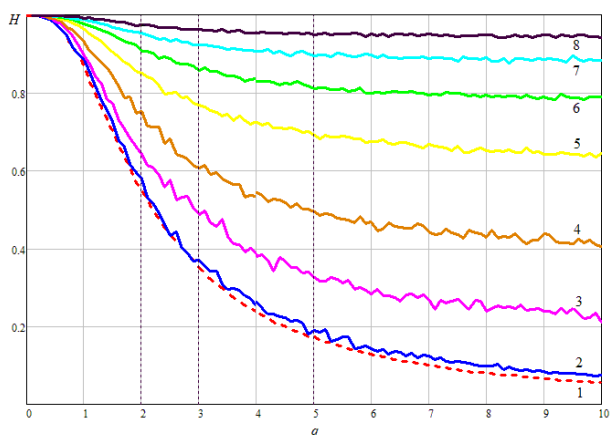


Рис. 4. Зависимость значений энтропии от ОСШ для аддитивной смеси квазидетерминированного сигнала и собственного шума для различных значений СКО случайной частоты

флуктуациях более $\sigma_f \approx 10\Delta f$ энтропия стремится к значению $\ln(N)$, т.е. процесс становится полностью некогерентным.

В разделе 1.4 рассматривается математическая модель оценки степени когерентности сигналов, в которых кроме собственных шумов присутствует некоторый постоянный уровень флуктуаций амплитуды.

Во второй главе проводится анализ степени когерентности активных шумовых помех в радиолокационных системах.

В разделе 2.1 проводится оценка когерентности шумовых помех на основе анализа распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы для двух случаев воздействия помех: АШП создается одним внешним источником шума малого углового размера; АШП создается двумя некоррелированными между собой внешними источниками.

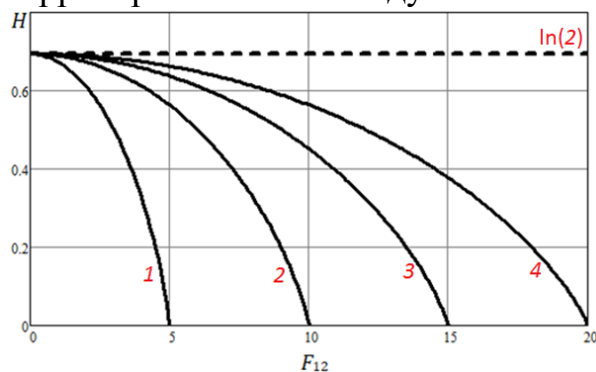


Рис. 5. Зависимость значений энтропии от величины скалярного произведения F_{12} :
кривая 1 – $N=5$; кривая 2 – $N=10$;
кривая 3 – $N=15$; кривая 4 – $N=20$

В разделе 2.2 проводится анализ основных факторов, влияющих на когерентность АШП. Рассматривается влияние ширины частотного диапазона АШП на оценку степени ее когерентности. Проводится анализ когерентности АШП

Кривая 1 – $\sigma_f=0$; кривая 2 – $\sigma_f=0,3$; кривая 3 – $\sigma_f=1$; кривая 4 – $\sigma_f=2$; кривая 5 – $\sigma_f=4$; кривая 6 – $\sigma_f=6$; кривая 7 – $\sigma_f=8$; кривая 8 – $\sigma_f=10$). Пунктирной линией (кривая 1) на рис. 4 показана энтропия процесса без флуктуаций частоты.

Из графиков видно, что при значениях случайной частоты менее $\sigma_f \approx 0,3\Delta f$ (кривая 2) флуктуациями частоты процесса можно пренебречь, т.е. сигнал можно считать когерентным. А при частотных

По мере уменьшения величины $|F_{12}|$ энтропия распределения энергии помехи монотонно возрастает, достигая своего максимального значения $H=\ln(2)\approx 0,693$ при $|F_{12}|=0$, так как с уменьшением $|F_{12}|$ векторы Φ_1 и Φ_2 становятся все менее коллинеарными, при наличии m некоррелированных ортогональных внешних источников при ОПШ $q \rightarrow \infty$ энтропия будет стремиться к значению $H = \ln(m)$.

относительно когерентности детерминированного (полезного) гармонического сигнала. Рассматриваются АШП с шириной спектра $\Delta f_{\text{ашп}}$, кратные полосе полезного сигнала Δf_c , которая, в свою очередь, согласована с полосой пропускания приёмной системы $\Delta f_{\text{п}}$: $\Delta f_c = \Delta f_{\text{п}}$, $\Delta f_{\text{ашп}} = \alpha \cdot \Delta f_c$, $\alpha = 1, 2, \dots$

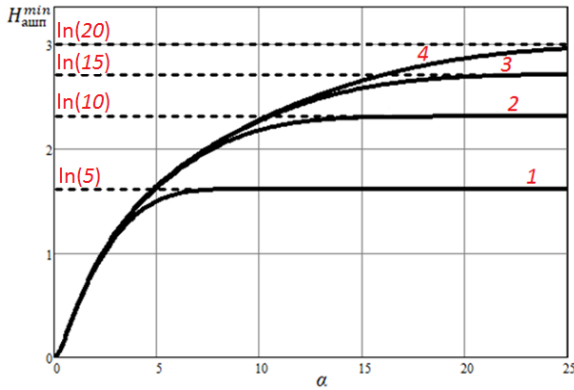


Рис. 6. Зависимость значения энтропии $H_{\text{ашп}}^{\min}$ от коэффициента α при различной длине выборки процесса N : кривая 1 – $N=5$; кривая 2 – $N=10$; кривая 3 – $N=15$; кривая 4 – $N=20$

Значения энтропии $H_{\text{ашп}}^{\min}$ стремятся к своим максимальным значениям $H \rightarrow \ln(N)$ при $\Delta f_{\text{ашп}} \approx N \cdot \Delta f_c$, т.е. процесс можно считать некогерентным.

Полученные в данном разделе результаты оценки когерентности АШП позволяют, с определенной строгостью, ввести понятие «широкополосной помехи» при выполнении соотношения $\Delta f_{\text{ашп}} \approx N \cdot \Delta f_c$.

Аналогично, при значениях полосы помехи порядка $\Delta f_{\text{ашп}} < N \cdot \Delta f_c$ шумовая помеха является частично когерентной, и данную помеху можно условно считать «узкополосной» («прицельные»).

Также рассматривается влияние нестационарности помеховой обстановки на оценку степени когерентности АШП. Пусть за время обработки луч антенной решетки отклонился от направления на источник АШП на угол β . Обозначим вектор Φ_0 – вектор внешней помехи, Φ_1 – вектор внешней помехи, отклонившийся на угол β . Вектор Φ_1 может быть представлен в виде ортогональной проекции

$$\Phi_1 = \mathbf{P} \cdot \Phi_0, \quad (8)$$

где $\mathbf{P} = \mathbf{B}(\mathbf{B}^* \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^*$ – матрица-проектор, $\mathbf{B} = [\Phi_1, \Phi_0]$.

В соответствии с этим, выражение энтропии может быть представлено в виде:

$$H = \ln(aq^2N + N) - \frac{aq^2N+1}{aq^2N+N} \cdot \ln(aq^2N + 1), \quad (9)$$

где $a = \cos(\beta)$.

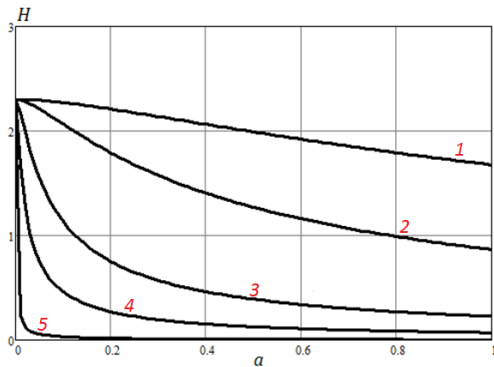


Рис. 7. Зависимость энтропии от параметра $a = \cos(\beta)$ при фиксированных значениях помеха/шум q : кривая 1 – $q=1$; кривая 2 – $q=2$; кривая 3 – $q=5$; кривая 4 – $q=10$; кривая 5 – $q=50$

Несоответствие параметров весовых коэффициентов автокомпенсатора АШП и пространственному положению диаграммы направленности антенны и источника помехи приводит к разрушению когерентности принимаемого процесса. При отклонении луча на величину ширины диаграммы направленности (т.е. в случае ортогональных сигналов, $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$, $|\cos(\beta)| \rightarrow 0$) значение энтропии H

стремится к 0 при больших значениях отношения помеха/шум.

Также в данном разделе рассматривается влияние времени воздействия АШП на оценку ее степени когерентности. Проведена оценка степени когерентности АШП при $t_{АШП} < t_{ОБР}$.

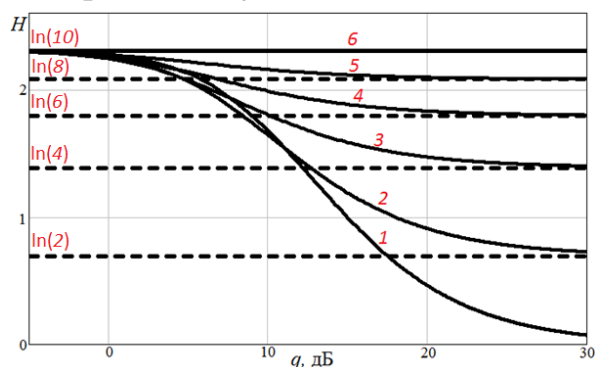


Рис. 8. Зависимость энтропии от отношения помеха/шум для различных значений параметра m : кривая 1 – $m=1$; кривая 2 – $m=2$; кривая 3 – $m=4$; кривая 4 – $m=6$; кривая 5 – $m=8$; кривая 6 – $m=10$

При наличии только одной выборки помехи ($m = 1$) и по мере увеличения отношения помеха/шум (при $q \rightarrow \infty$) значения энтропии H стремится к нулю, аналогично аддитивной смеси детерминированного сигнала и гауссового шума. При значениях $m > 1$ с возрастанием q энтропия H монотонно уменьшается, достигая своего минимального значения $H = \ln(m)$.

Таким образом, характер когерентности прерывистой АШП

будет аналогичен сумме m ортогональных независимых фронтов внешних источников помехи со случайной мощностью.

В главе 3 проводится анализ степени когерентности радиолокационных сигналов, отраженных от источников пассивных помех с различными спектральными характеристиками, обусловленными различной скоростью ветра.

В разделе 3.1 рассматривается модель пассивной помехи как колебания с флуктуациями частоты Доплера f , распределенными по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_f относительно средней частоты Доплера f . В случае сигнала, отраженного от пассивной помехи, с КМ $\mathbf{R}$ энтропия $H_{ПП}$ при ОСШ $q \rightarrow \infty$ будет стремиться не к нулю, а к постоянному значению $H_{ППmin}$, которое будет определяться шириной спектра пассивной помехи. Степень «некогерентности» пассивной помехи $H_{ППmin}$ будет являться ограничением при её подавлении в системе селекции движущихся целей РЛС. Т.е. максимальный коэффициент подавления пассивной помехи можно выразить через степень когерентности в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Максимальный коэффициент подавления пассивной помехи на выходе системы СДЦ можно представить в виде:

$$Q_{max} \sim \ln(N)/H_{ППmin}, N > 1. \quad (10)$$

При увеличении среднеквадратической ширины спектра ПП σ_v уменьшается коэффициент подавления пассивной помехи: при легком ветре ($\sigma_v \sim 0.12$ м/с) коэффициент подавления пассивной помехи будет составлять величину порядка (40÷50) дБ, а при штормовом ветре ($\sigma_v \sim 0.33$ м/с) будет ограничено значениями порядка (10÷20) дБ.

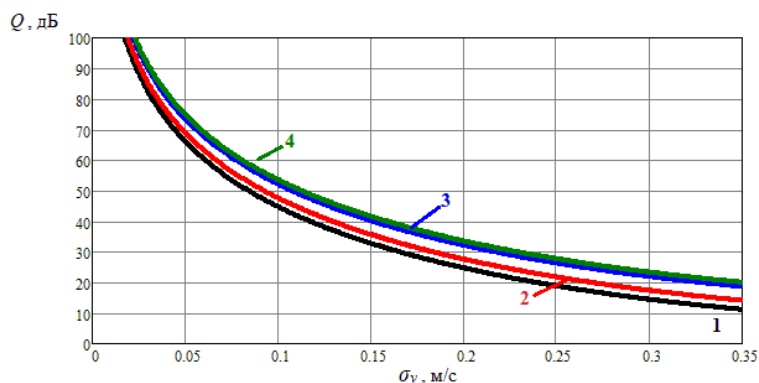


Рис. 9. Зависимость коэффициента подавления пассивной помехи от среднеквадратической ширины спектра σ_v пассивной помехи для различных значений длины выборки процесса N и длине волны $\lambda=23$ см: 1 - $N=5$; 2 - $N=10$; 3 - $N=50$; 4 - $N=100$

отраженных от помехи и цели. Без ограничения общности рассматривается наиболее простой для анализа, но показательный случай, когда отсутствует доплеровское расширение спектра пассивной помехи за счет влияния ветра, т.е. сумму двух детерминированных сигналов с частотой Доплера $f_{\text{пл}}$ и с частотой Доплера $f_{\text{ц}}$.

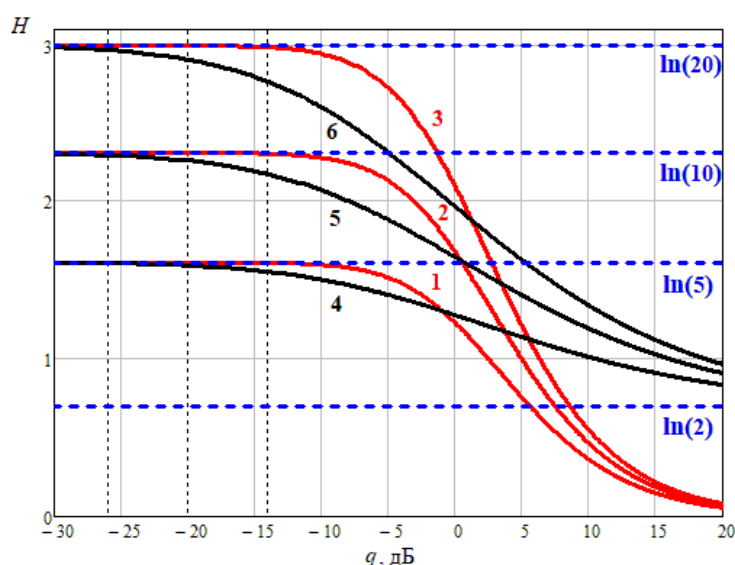


Рис. 10. Зависимость значений энтропии одиночного сигнала (кривые 1,2,3) и аддитивной смеси сигналов, отраженных от источника пассивной помехи (местного предмета) и подвижной цели (кривые 4,5,6), на фоне собственного шума от отношения сигнал/шум $q=v_1/\sigma$ (ОСШ) при равных значениях мощности сигналов, отраженных от цели и помехи $v_1=v_2$ для различной длины выборки N : 1, 4 - $N=5$; 2, 5 - $N=10$; 3, 6 - $N=20$

цели может быть меньше, чем мощность одновременно приходящей с ним помехи.

$$Q_{\text{ппв}}[\text{дБ}] \sim 20 \cdot \lg(P_{\text{пл}} / (1/N)) = 20 \cdot \lg(P_{\text{пл}}) + 20 \cdot \lg(N), \quad (11)$$

где $P_{\text{пл}}$ [дБ] – мощность пассивной помехи.

Таким образом, мера когерентности радиолокационных сигналов позволяет дать качественную оценку максимальной подпомеховой видимости

Таким образом, видно, что при уменьшении степени когерентности радиолокационных сигналов, отраженных от источников пассивных помех, за счет расширения доплеровского спектра будет уменьшаться коэффициент подавления пассивной помехи.

В разделе 3.2 проводится оценка когерентности аддитивной смеси радиолокационных сигналов,

Из рис. 10 можно увидеть, что отличие поведения энтропии одиночного сигнала (когда мощность помехи много больше мощности сигнала от цели, $v_2 \gg v_1$) от поведения энтропии аддитивной смеси проявляется при мощности сигнала $v_2 \sim -20 \cdot \lg(1/N)$ (при $N = 5$, $v_2 \approx -14$ дБ; при $N = 10$, $v_2 \approx -20$ дБ; при $N = 20$, $v_2 \approx -26$ дБ). Отношение мощности пассивной помехи к мощности сигнала, при которой проявляется различие в энтропии одиночного сигнала от энтропии аддитивной смеси, можно интерпретировать как подпомеховую видимость – отношение, показывающее во сколько раз мощность сигнала

радиолокационной системы.

В четвертой главе проводится синтез методов пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов с учетом когерентных свойств сигналов и помех.

В разделе 4.1 проводится синтез алгоритма повышения эффективности работы системы автокомпенсации активных шумовых помех РЛС малой дальности. Рассмотрен алгоритм трехканального автокомпенсатора активной шумовой помехи на основе метода непосредственного обращения корреляционной матрицы помех. Предложен алгоритм повышения эффективности работы автокомпенсатора, основанный на процедуре линейной интерполяции коэффициентов настройки.

В рамках данного исследования был проведен ряд натурных экспериментов с трехкоординатной когерентно-импульсной РЛС кругового обзора дециметрового диапазона длин волн с 3-канальным АК при воздействии двух постановщиков АШП, разнесенных на 50° по азимуту. Уровень каждой помехи над собственным шумом приемника по главному лучу ДН антенны составлял 40 дБ.

Результаты натурных экспериментов показали, что предложенные алгоритмы позволяют эффективно выделить полезный сигнал на фоне помех, подавляя активные помехи практически до уровня собственных шумов. В трехканальном АК АШП при использовании процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов, при величине интервалов между служебными зонами не менее $1/4$ ширины ДНА ОК по уровню минус 3 дБ, может быть реализован коэффициент подавления ШАП в среднем в пределах 15-20 дБ, что позволяет повысить эффективность работы АК АШП РЛС малой дальности в условиях изменения угловых соотношений между лучом антенны и постановщиком помех и увеличения временного интервала между служебными зонами.

В разделе 4.2 проводится синтез системы селекции движущихся целей когерентной импульсной РЛС. Проводится оценка когерентных свойств системы межпериодной обработки пачки радиолокационных импульсов.

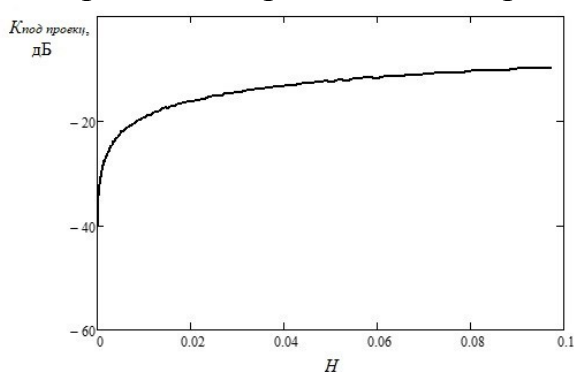


Рис. 11. Зависимость коэффициента подавления пассивной помехи проекционного метода от степени когерентности пачки импульсов

системам (50-60 дБ) достигается только при высокой степени когерентности принимаемой пачки ($H < 10^{-5}$).

Также в данном разделе рассматривается метод квазиоптимальной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне пассивных внешних помех и

Методом численного моделирования была получена зависимость коэффициента подавления пассивной помехи проекционного метода от степени когерентности пачки импульсов (рис. 11). Количество импульсов в пачке $N=20$. Для $N=20$ процесс становится полностью некогерентным при $H = \ln(N) = 3$. Как видно из рис. 11 достаточно высокий коэффициент подавления, соответствующий современным требованиям к радиолокационным

собственного шума, основанный на аппроксимации неизвестной обратной корреляционной матрицы помех матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помех. Проводится синтез системы селекции движущихся целей когерентной импульсной РЛС на основе проекционного метода доплеровской фильтрации.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Энтропия распределения энергии сигнала по собственным подпространствам корреляционной матрицы позволяет получить количественную оценку степени когерентности сигналов с фазо-частотными флуктуациями. Это позволяет использовать оценку степени когерентности для решения задач, в которых требуется анализ параметров сигналов при прохождении (распространении) в среде или через различные радиотехнические системы – в радиолокационных системах, в радиофизических измерительных системах, в задачах исследования электромагнитной обстановки, в задачах обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, в системах радионавигации и радиосвязи.

2. Результаты численного моделирования когерентности сигналов с фазовыми и частотными флуктуациями позволили определить границы когерентности сигналов с частотными и фазовыми флуктуациями:

а) при значениях случайной фазы равных $\sigma_\varphi \approx 0.1 \approx \pi/30$ и при значениях случайной частоты равных $\sigma_f \approx 0.3\Delta f$ флуктуациями параметров сигнала можно пренебречь, т.е. процесс при ОСШ $q \rightarrow \infty$ можно считать когерентным.

б) при фазовых флуктуациях $\sigma_\varphi \approx \pi/2$ и при частотных флуктуациях $\sigma_f \approx 10 \cdot \Delta f$ (Δf - полоса приёмного устройства) энтропия процесса стремится к значению $\ln(N)$, т.е. процесс становится полностью некогерентным.

в) в случае частично когерентного сигнала значение энтропии при ОСШ $q \rightarrow \infty$ стремится к постоянному значению, определяемому распределением флуктуаций фазы (частоты) процесса;

3. Квазидетерминированный сигнал с небольшим отношением сигнал/шум ($q \rightarrow 0$) может иметь такую же степень когерентности, как и сигнал с большим отношением сигнал/шум ($q \rightarrow \infty$), но с некоторым постоянным уровнем фазо-частотных флуктуаций.

4. Когерентность процессов в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы с различным уровнем и видом флуктуаций (амплитудных, фазовых, частотных) может быть одинаковой. Это позволяет сравнивать процессы с различными видами и уровнями флуктуаций, используя предложенную меру когерентности.

5. Полученная оценка и проведенный анализ степени когерентности активной шумовой помехи на основе анализа распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы позволила придать когерентным свойствам активных шумовых помех количественную оценку. Это позволяет использовать полученную информационную меру для оценки качества радиотехнических систем.

6. Получены оценки влияния ширины частотного диапазона, влияния

нестационарности помеховой обстановки и влияния времени воздействия активной шумовой помехи на степень когерентности активной шумовой помехи:

- при выполнении соотношения $\Delta f_{\text{ашп}} \approx N \cdot \Delta f_c$ АШП является некогерентной и данную помеху можно считать «широкополосной»;
- при выполнении соотношения $\Delta f_{\text{ашп}} < N \cdot \Delta f_c$ шумовая помеха является частично когерентной и данную помеху можно считать «узкополосной».

7. Анализ когерентности радиолокационных сигналов, отраженных от источников пассивных помех с различными спектральными характеристиками, показал, что значение энтропии может быть использовано для оценки максимального коэффициента подавления пассивной помехи и оценку максимальной подпомеховой видимости в системе селекции движущихся целей.

8. Получены зависимости коэффициента подавления пассивной помехи от среднеквадратической ширины спектра пассивной помехи для различных значений длины выборки процесса и длины волны. Показано, что при уменьшении степени когерентности радиолокационных сигналов, отраженных от пассивных помех, за счет расширения доплеровского спектра, будет уменьшаться коэффициент подавления пассивной помехи.

9. Анализ когерентности аддитивной смеси сигналов, отраженных от помехи и цели, показал, что мера когерентности радиолокационных сигналов в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы позволяет дать качественную оценку максимальной подпомеховой видимости.

10. Предложенный алгоритм, основанный на процедуре линейной интерполяции коэффициентов настройки АК АШП, позволяет повысить эффективность работы АК АШП РЛС малой дальности в условиях изменения угловых соотношений между лучом антенны и постановщиком помех и увеличения временного интервала между служебными зонами. Показано, что в случае нестационарной помеховой обстановки использование процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов позволяет увеличить коэффициент подавления шумовой активной помехи в среднем на 5 дБ.

11. Обосновано использование квазиоптимального проекционного метода селекции движущихся целей импульсной РЛС с учетом когерентности принимаемой пачки импульсов. Получена зависимость коэффициента подавления пассивной помехи проекционного метода от степени когерентности пачки импульсов. Показано, что коэффициент подавления, соответствующий современным требованиям к радиолокационным системам (больше 50-60 дБ) достигается при высокой степени когерентности принимаемой пачки ($H < 10^{-5}$).

12. Получена зависимость коэффициента подавления пассивной помехи оптимального и проекционного методов от флуктуаций нормированной частоты $f/\Delta f$, $\Delta f = 1/N$. Показано, что коэффициент подавления больше 50-60 дБ достигается при значениях случайной частоты равных $\sigma_f \approx 0.3\Delta f$, т.е. при достаточно высокой степени когерентности принимаемого процесса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Оценка когерентности радиолокационных сигналов с флуктуациями параметров / Е. С. Фитасов, И. Я. Орлов, Е. В. Леговцова, В. В. Насонов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 69-82. (WoS, Scopus)
2. Селекция имитирующих сигналоподобных помех в радиолокационных системах с внутренней когерентностью / Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова, О. Е. Кудряшова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 11. – С. 917-925. (WoS, Scopus)
3. Когерентность активных шумовых помех в радиолокационных системах с антенными решётками / Е. С. Фитасов, О. Е. Кудряшова, Е. В. Леговцова, В. В. Насонов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 159-168. (WoS, Scopus)
4. Леговцова, Е. В. Когерентность радиолокационных сигналов, отраженных от источников пассивных помех / Е. В. Леговцова, Е. С. Фитасов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 7. – С. 590-597. (WoS, Scopus)
5. Козлов С.А., Фитасов Е.С., Василенко (Леговцова) 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.
6. Система защиты импульсной радиолокационной системы от дискретных метеообразований / Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова, С. А. Козлов, В. В. Насонов // Датчики и системы. – 2017. – № 8-9(217). – С. 13-19.
7. Доплеровская фильтрация радиолокационных сигналов, отражённых от малоскоростных воздушных объектов / Е. В. Леговцова, О. Е. Кудряшова, Е. С. Фитасов, Д. А. Васильев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2020. – № 3(47). – С. 44-50.
8. Экспериментальная оценка проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов при обнаружении воздушных объектов с малыми радиальными скоростями / Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова, Д. А. Пальгуйев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 331-340. (WoS, Scopus)

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

1. К вопросу оценки радиальной скорости радиолокационного объекта методом наименьших квадратов для случая неизвестной корреляционной матрицы помех / Е. С. Фитасов, В. А. Односевцев, В. В. Насонов, Е. В. Леговцова // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2018. – № 1(2). – С. 49-54.
2. Василенко (Леговцова), Е.В. Метод степенного базиса при синтезе оптимальной обработки сигналов в адаптивных антенных решетках / Е.В. Василенко,

П.В. Михеев // 14-я научная конференция по радиофизике, Н. Новгород, 2010. – С. 232-233.

3. Василенко (Леговцова), Е.В. Алгоритм повышения эффективности работы автокомпенсатора шумовых активных помех РЛС малой дальности на основе процедуры линейной интерполяции коэффициентов настройки / Е.В. Василенко, Е.С. Фитасов // Труды XV научной конференции по радиофизике, Н. Новгород, 2011. – С. 104-105.

4. Василенко (Леговцова), Е.В. Экспериментальные исследования системы автокомпенсации шумовых активных помех на основе метода линейной интерполяции коэффициентов настройки / Е.В. Василенко, Е.С. Фитасов, С.А. Козлов // Труды XVI научной конференции по радиофизике, Н. Новгород, 2012. – С. 120-122.

5. Леговцова Е.В., Фитасов Е.С., 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. Нижний Новгород, 2015. – С. 149-150.

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

7. Проекционный метод доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов, отраженных от малоскоростных воздушных объектов / Е. В. Леговцова, Е. С. Фитасов, Д. А. Васильев [и др.] // Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета, Нижний Новгород, 13–31 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – С. 241-243.

8. Оценка когерентных свойств радиолокационных сигналов с флуктуациями фазы / Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова, М. А. Борисова [и др.] // Труды XXIV научной конференции по радиофизике, посвященной посвящённой 75-летию радиофизического факультета, Нижний Новгород, 13–31 мая 2020 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – С. 238-240.

9. Когерентность радиотехнических сигналов с флуктуациями параметров / И. Я. Орлов, Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова, О. Е. Кудряшова // Перспективные технологии в средствах передачи информации : материалы 14-ой международной научно-технической конференции, Владимир, 06–07 октября 2021 года. – Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2021. – С. 156-159.

10. Оценка когерентных свойств радиолокационных сигналов с флуктуациями частоты / Е. А. Федосеева, О. Е. Кудряшова, Е. В. Леговцова [и др.] // Труды XXV

научной конференции по радиофизике : материалы докладов, Нижний Новгород, 14–26 мая 2021 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2021. – С. 247–250.

11. Леговцова, Е. В. Оценка когерентности пассивных радиолокационных помех / Е. В. Леговцова // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой : Материалы конференции, Нижний Новгород, 12–27 мая 2022 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – С. 288–292.

12. Когерентность активных шумовых помех в радиолокационных системах с антенными решетками / О. Е. Кудряшова, Е. В. Леговцова, В. В. Насонов, Е. С. Фитасов // 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. 89–97.

13. Экспериментальные исследования проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов при обнаружении воздушных объектов с малыми радиальными скоростями / Е. В. Леговцова, С. А. Козлов, Е. С. Фитасов, Д. А. Васильев // 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.

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

15. Леговцова, Е. В. Оценка когерентных свойств системы межпериодной обработки пачки радиолокационных импульсов / Е. В. Леговцова // Труды XXVII научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, 15–25 мая 2023 года. – Нижний Новгород: Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2023. – С. 250–253.

Свидетельства о государственной регистрации (патенты на изобретения)

1. Патент № 2593276 С1 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ селекции движущихся целей : № 2015132506/07 : заявл. 04.08.2015 : опубл. 10.08.2016 / Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова ; заявитель Акционерное общество "Федеральный научно-производственный центр "Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники".

2. Патент № 2807614 С1 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ формирования весового коэффициента в условиях нестационарности помеховой обстановки : № 2022128263 : заявл. 28.10.2022 : опубл. 17.11.2023 / В. В. Насонов, Е. С. Фитасов, Е. В. Леговцова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны" Министерства обороны Российской Федерации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СТЕПЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ФЛУКТУАЦИЯМИ ПАРАМЕТРОВ	24
1.1. Оценка степени когерентности радиолокационных сигналов в виде энтропии распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы	24
1.2. Когерентность сигналов с флуктуациями фазы	31
1.3. Когерентность сигналов с флуктуациями частоты	38
1.4. Когерентность сигналов с постоянными флуктуациями амплитуды	44
1.5. Выводы по главе 1	47
ГЛАВА 2. КОГЕРЕНТНОСТЬ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ	49
2.1. Оценка когерентности шумовых помех на основе анализа распределения энергии сигнала по собственным числам корреляционной матрицы	49
2.2. Оценка основных факторов, влияющих на степень когерентности активных шумовых помех	54
2.2.1. Влияние ширины частотного диапазона активной шумовой помехи на оценку степени ее когерентности	54
2.2.2. Влияние нестационарности помеховой обстановки на оценку степени когерентности активных шумовых помех	57
2.2.3. Влияние времени воздействия активной шумовой помехи на оценку ее степени когерентности	60
2.3. Выводы по главе 2	62
ГЛАВА 3. КОГЕРЕНТНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ИСТОЧНИКОВ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ	64
3.1. Когерентность радиолокационных сигналов с флуктуациями частоты	64
3.2. Когерентность суммы радиолокационных сигналов, отраженных от источника пассивной помехи и цели	70
3.3. Выводы по главе 3	76
ГЛАВА 4. СИНТЕЗ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ	77
4.1. Синтез алгоритма повышения эффективности работы системы автокомпенсации активных шумовых помех РЛС малой дальности	78
4.1.1. Синтез трехканального автокомпенсатора шумовой активной помехи в РЛС малой дальности	79
4.1.2. Синтез алгоритма линейной интерполяции коэффициентов настройки автокомпенсации шумовых активных помех	83

4.1.3. Результаты компьютерного моделирования	84
4.1.4. Результаты на основе экспериментальных данных	96
4.2. Синтез системы селекции движущихся целей когерентной импульсной РЛС	101
4.2.1. Оценка когерентных свойств системы межпериодной обработки пачки радиолокационных импульсов	101
4.2.2 Проекционный метод квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов	106
4.3. Выводы по главе 4	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123

Леговцова Елена Витальевна

**Исследование когерентности сигналов и помех в импульсных
радиолокационных системах**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____ г. Заказ № _____

Формат _____. Усл. печ. л 1. Тираж 100 экз.

Типография _____