

*На правах рукописи*



Фитасов Евгений Сергеевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ  
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МАЛОГАБАРИТНЫХ МОБИЛЬНЫХ  
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ  
ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Специальность 05.12.14 – радиолокация и радионавигация

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского»

Официальные оппоненты: **Рындык Александр Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных радиосистем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
**Антипов Владимир Никитович**,  
доктор технических наук, профессор, главный специалист Публичного Акционерного Общества «Туполев»  
**Козлов Анатолий Иванович**,  
доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры технической эксплуатации радиотехнического оборудования воздушного транспорта, советник ректора Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета ДС 212.141.11 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, прошу направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э.Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



И.Б.Власов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Одной из основных задач, определяющих развитие радиолокационных средств, является обеспечение обнаружения воздушных объектов на малых и предельно малых высотах. Кроме того, активное развитие легкомоторной авиации, находящейся, в том числе, в частном пользовании, ставит перед системой контроля воздушного пространства задачу по устранению новой угрозы для безопасности воздушного движения над административно-политическими центрами и объектами техногенных катастроф. Также, осуществление контроля за порядком использования воздушного пространства постоянно усложняется в связи бурным развитием беспилотных летательных аппаратов различного класса и назначения. Данная проблема характерна и особенно актуальна для воздушного пространства в районе крупных административных центров. При этом, требования электромагнитной совместимости, а также санитарных норм и правил ограничивают применения в мирное время сверхвысокочастотного излучения высокопотенциальных радиолокационных станций. Обобщая, можно сформулировать основные причины, следствием которых является актуальность проблемы обнаружения низколетящих воздушных объектов:

- развитие маневренных возможностей средств воздушного нападения;
- развитие средств помехопостановки радиолокационным системам;
- развитие гражданской авиации;
- развитие частной легкомоторной маловысотной авиации;
- появление и бурное развитие нового класса летательных аппаратов – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- усложнение электромагнитной обстановки (промышленные и бытовые радиопомехи);
- ужесточение требований и норм электромагнитной совместимости.

Таким образом, задача создания маловысотного радиолокационного поля, в том числе с применением низкопотенциальных, мобильных, малогабаритных активных радиолокационных систем, остается актуальной на протяжении уже нескольких десятилетий.

К современным радиолокационным системам обнаружения низколетящих воздушных объектов предъявляются следующие основные технические требования:

- надежное обнаружение воздушных объектов, в том числе низколетящих и малоразмерных, на фоне экранирующего действия рельефа местности и местных предметов;
- надежное подавление отражений от подстилающей поверхности, местных предметов, гидрометеоров и пассивных помех;
- обеспечение разрешения объектов;
- возможность классификации и распознавания типов объектов (в том числе малоразмерных легкомоторных самолетов, беспилотных летательных аппаратов и «зависших» летательных аппаратов – вертолетов и мультикоптеров);
- помехозащищенность по отношению к различному виду активных помех;
- малая излучаемая мощность;
- высокая мобильность.

Реализация приведенных выше технических требований, отчасти противоречивых (с одной стороны – необходимость обеспечения заданной зоны обзора, помехозащищенности, высоких точностей и разрешающей способности, с другой – требования по мобильности, нормам излучения, которые исключают применение мощных передающих устройств и/или накладывают ограничения на размеры антенной системы), возможна только при сочетании конструктивно-технологических решений и использовании современной высокопроизводительной вычислительной техники с оптимальными (квазиоптимальными) методами обработки. Поэтому становятся актуальными, с практической точки зрения, задачи синтеза алгоритмов, требующих относительно небольших вычислительных затрат с одной стороны, и удовлетворяющих тому или иному частному критерию оптимальности, связанному с предъявленными к устройству техническими требованиями – с другой.

Известны отечественные и зарубежные активные радиолокационные системы гражданского и военного назначения, в том числе мобильные радиолокационные обнаружители низколетящих воздушных объектов с возможностью подъема антенны на мачтовом устройстве, реализующие в той или иной мере данные требования. Большинство этих радиолокационных средств работает в диапазоне частот более 2 ГГц, поэтому их эффективность при работе в осадках снижается из-за возрастания затухания радиоволн при распространении, приводящего к уменьшению дальности обнаружения. Кроме того, в основном, данные радиолокационные системы решают ряд узких специальных задач, например, обнаружение, артиллерийских снарядов, мин, наземных движущихся объектов. При этом, приведенные выше требования в полном объеме не реализуются.

Одной из основных задач при разработке РЛС является синтез системы цифровой обработки радиолокационной информации, обеспечивающей обнаружение, оценку параметров, разрешение и распознавание радиолокационных целей в заданных пределах работы на фоне активных и пассивных помех и вносящей минимальные потери в отношении сигнал/шум при обнаружении сигнала, отраженного от радиолокационной цели. Вопросы обнаружения, оценки параметров и разрешения радиолокационных сигналов, в том числе при воздействии активных и пассивных помех изучены достаточно подробно. Однако, несмотря на исчерпывающую информацию по отдельным рассмотренным вопросам, в современной научной литературе отсутствуют алгоритмы и методики проектирования активных радиолокационных систем обнаружения низколетящих воздушных объектов, предполагающие комплексный подход к синтезу системы пространственно-временной обработки сигналов на фоне помех. При этом, комплексный подход подразумевает жесткую взаимосвязь алгоритмов обработки, режимов работы радиолокационной системы, особенностей построения антенной, передающей и приемной систем, пропускной способности каналов связи, вычислительной мощности специализированной цифровой вычислительной машины, массогабаритных характеристик, стоимостных показателей и т.д. А при проектировании малогабаритных мобильных радиолокационных систем (с ограничениями по массе, габаритам, энергопотреблению и т.д.), где одним из основных показателей эффективности системы будут являться минимальные потери в отношении сигнал/шум при обнаружении сигнала, исследования направленные на реализацию данного подхода, становятся особенно **актуальными**.

Очевидно, что при обнаружении радиолокационными системами низколетающих воздушных объектов значительное экранирующее действие оказывает рельеф местности и местные предметы, что приводит к уменьшению дальности действия локационной системы. Проведение оценок эффективности работы радиолокационных систем по маловысотным объектам требует учета экранирующего действия местности, при этом можно считать, что максимальная дальность обнаружения низколетающих объектов радиолокационных систем коротковолнового диапазона волн (X, S, и коротковолновой части L диапазона длин волн) равна дальности радиовидимости цели. При этом, одним из наиболее рациональных способов увеличения дальности обнаружения низколетающих воздушных объектов радиолокационными средствами является подъем фазового центра антенны радиолокационной системы над земной поверхностью. Также, обнаружение сигнала, отраженного от маловысотного объекта, проводится на фоне интенсивных помех - отражений от подстилающей поверхности и местных предметов, что подразумевает реализацию высокоэффективной системы подавления (компенсации) пассивных помех. Данные два фактора в решении проблемы обнаружения маловысотных (низколетающих) воздушных объектов можно выделить как основные. Кроме того, к современным радиолокационным средствам, как было отмечено выше, предъявляются дополнительные технические требования по информативности, помехозащищенности и мобильности.

Одной из основных задач при разработке радиолокационных систем является синтез цифровой обработки радиолокационной информации, которая будет определять конечный технический и конструктивный облик радиолокационной системы. При этом, система цифровой обработки радиолокационной информации должна обеспечивать обнаружение, оценку параметров, разрешение и распознавание радиолокационных объектов в заданных пределах работы на фоне активных и пассивных помех и вносящей минимальные потери в отношении сигнал/шум при обнаружении сигнала.

Обнаружение низколетающих воздушных объектов на малых и предельно малых высотах в основном ряде случаев будет характеризоваться сложной сигнально-помеховой обстановкой. Это означает наличие:

- отражений от нескольких объектов – групповых целей в одном импульсном разрешаемом объеме;
- летательных аппаратов различных классов (реактивные и винтовые: самолеты, вертолеты, дельтапланы, парапланы, беспилотные летательные аппараты - БПЛА и т.д.);
- естественных радиопомех (индустриальные, помехи от метеорологических образований);
- организованных радиопомех (активные маскирующие, активные имитирующие).

Все перечисленные выше помехи будут оказывать существенное влияние именно в ближней зоне радиолокационной станции и при обнаружении объектов на малых высотах.

Таким образом, при системном анализе проблемы обнаружения низколетающих воздушных объектов можно выделить три основных направления исследований:

1. Оценка эффекта интерференции радиоволн и зон радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учетом их экранирования макрорельефом местности и местными предметами.

2. Синтез оптимальных (квазиоптимальных) методов пространственно-временной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне интенсивных отражений от подстилающей поверхности и местных предметов.

3. Синтез алгоритмов оценки параметров, разрешения, распознавания и помехозащиты от естественных и организованных радиопомех в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

**Целью работы** является развитие и техническая реализации методов цифровой обработки радиолокационных сигналов в мобильных малогабаритных радиолокационных системах при решении задач обнаружения низколетящих воздушных объектов в сложной сигнально-помеховой обстановке за счет комплексной реализации оптимальных (квазиоптимальных) методов обработки.

**Задачи работы:**

1. Разработать математическую модель оценки зон радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учетом их экранирования макрорельефом различных классов местности и местными предметами.

2. Синтезировать и получить экспериментальную оценку эффективности системы селекции движущихся целей на основе проекционного метода квазиоптимальной обработки когерентной пачки импульсов.

3. Оценить целесообразность использования непараметрических алгоритмов на основе порядковых статистик при обнаружении сигнала в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

4. Синтезировать систему распознавания винтовых летательных аппаратов с использованием вторичной модуляции радиолокационных сигналов во временной и частотной области.

5. Обосновать и экспериментально подтвердить целесообразность использования интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовой активной помехи с непосредственным обращением корреляционной матрицы для повышения помехозащищенности импульсных радиолокационных систем в условиях нестационарной помеховой обстановки.

6. Синтезировать и экспериментально исследовать систему селекции имитирующих сигналподобных помех на основе оценки количественной меры степени когерентности радиолокационных сигналов.

7. Реализовать комплексный системный подход при синтезе методов и алгоритмов обнаружения низколетящих воздушных объектов в малогабаритных радиолокационных станциях типа 1Л122-1Е и 1Л122-2Е.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная экспериментальная феноменологическая модель обеспечивает проведение оценки дальности обнаружения активной радиолокационной системой низколетящих воздушных объектов с учетом статистических закономерностей радиовидимости объектов по классам макрорельефов местности.

2. Запатентованная и экспериментально исследованная система селекции движущихся целей на основе проекционного метода квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов обеспечивает обнаружение низколетящих воздушных объектов на фоне интенсивных отражений от ме-

стных предметов и подстилающей поверхности с коэффициентом подавления пассивных помех в зоне режекции до минус 60 дБ.

3. Предложенный непараметрический алгоритм адаптивного формирования порога на основе порядковых статистик обеспечивает обнаружение каждого отдельного сигнала при нескольких близкорасположенных сигналах (в том числе слабого сигнала на фоне сильного) в случае сложной сигнально-помеховой обстановки в системах стабилизации уровня ложных тревог, пеленгации источников шумовых активных помех и защиты от импульсных помех.

4. Запатентованная и экспериментально исследованная система распознавания винтовых летательных аппаратов с использованием вторичной модуляции радиолокационных сигналов на основе авторегрессионного метода, позволяет повысить вероятность распознавания воздушного объекта, летящего на встречных курсах при ракурсных углах близких к нулевым, в среднем с 50% до 90% по сравнению с классическим алгоритмом, основанным на дискретном преобразовании Фурье.

5. Предложенный и экспериментально исследованный алгоритм интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовой активной помехи с непосредственным обращением корреляционной матрицы обеспечивает повышение коэффициента подавления помехи на 5-10 дБ в условиях нестационарной помеховой обстановке, а также позволяет решить задачу комплексной реализации систем автокомпенсации активных помех и межпериодной временной обработки сигналов.

6. Предложенный и экспериментально исследованный метод селекции имитирующих сигналподобных помех на основе оценки количественной меры степени когерентности радиолокационных сигналов обеспечивает, в отличие от существующих методов, эффективную селекцию воздушных объектов различных классов (самолет с винтовым двигателем, реактивный самолет, вертолет, беспилотный летательный аппарат).

7. Разработанные, с использованием методического аппарата и комплексной реализации, предложенных в диссертации теоретических и технических решений, и запатентованные малогабаритные мобильные трехкоординатные радиолокационные станции 1Л122-1Е и 1Л122-2Е, обеспечивают выполнение современных требований, предъявляемых к радиолокационным системам данного класса.

**Научная новизна** работы состоит, прежде всего, в развитии теории и методологии обнаружения низколетящих воздушных объектов активными радиолокационными системами, позволяющих проводить анализ и синтез системы и подсистем пространственно-временной обработки сигналов, определить подходы к проектированию радиолокационных станций, выделить факторы и пути повышения эффективности их применения. В частности:

1. Впервые проведена оценка статистических закономерностей радиовидимости низколетящих воздушных объектов по классам макрорельефов местности.

2. Предложен и запатентован способ селекции движущихся целей на основе проекционного метода квазиоптимальной межпериодной временной обработки когерентной пачки импульсов на фоне помехи с заданными корреляционными свойствами.

3. Разработаны новые методы стабилизации уровня ложных тревог, пеленгации источников шумовых активных помехи и защиты от импульсных помех с адаптивным порогом обнаружения на основе порядковых статистик, обеспечи-

вающие, в отличие от существующих методов, обнаружение групповых целей в сложной сигнально-помеховой обстановке.

4. Предложен частотно-временной подход к распознаванию винтовых летательных аппаратов с использованием вторичной модуляции радиолокационных сигналов во временной и частотной области. В отличие от существующих, алгоритмы, заложенный в основу работы запатентованных устройств, дают возможность выделять радиолокационные сигналы, отраженные от лопастей винтовых летательных аппаратов, при их короткой выборке.

5. Обоснован новый метод компенсации шумовой активной помехи с непосредственным обращением корреляционной матрица помех в условиях нестационарной помеховой обстановки с учетом комплексной реализации систем пространственно-временной обработки. В отличие от существующих методов позволяет учитывать динамическую ошибку в настройке автокомпенсатора, связанную с вращением антенны.

6. Впервые теоретически обосновано и экспериментально доказано использование оценки количественной меры степени когерентности радиолокационных сигналов для решения проблемы селекции имитирующих сигналподобных помех.

7. Комплексная реализация предложенных методов и алгоритмах впервые реализована в запатентованных радиолокационных системах.

В общем, новизна предложенных в работе алгоритмов и технических решений подтверждена четырьмя патентами на изобретения и восьмью патентам на полезные модели.

**Теоретическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Разработана экспериментальная феноменологическая модель на основе геометрической модели влияние углов закрытия на дальность обнаружения низколетящего воздушного объекта с учетом статистических закономерностей радиовидимости объектов по классам макрорельефов местности.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность использования проекционного метода обнаружения полезного сигнала на фоне помехи с заданными корреляционными свойствами, использующего аппроксимацию неизвестной обратной корреляционной матрицы помехи матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помех, для синтеза системы селекции движущихся целей импульсных радиолокационных систем.

3. На основе развития теории порядковых статистик разработана методика формирования адаптивного порога обнаружения для решения задачи обнаружения слабых сигналов на фоне сильных, пеленгации источников шумовых активных помехи и защиты от импульсных помех.

4. Обоснована целесообразность использования метода наименьших квадратов для синтеза системы разрешения радиолокационных объектов и обеспечивающего, по сравнению с существующими методами, сверхрелеевское разрешение, оценку параметров сигнала групповой цели и его распространение на модель сигнала с произвольным количеством целей.

5. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования авторегрессионных методов спектрального анализа для распознавания винтовых летательных аппаратов по вторичной модуляции радиолокационных сигналов во временной и частотной области при короткой выборке сигнала.

6. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность использования интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовой активной помехи для повышения помехозащищенности импульсных радиолокационных систем в условиях нестационарной помеховой обстановки.

7. Впервые теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность использование энтропии распределения энергии радиолокационного сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы для селекции имитирующих сигналоподобных помех.

**Практическая значимость работы** заключается следующем:

1. Систематизирована методология синтеза активных импульсных радиолокационных систем обнаружения низколетящих воздушных объектов, обеспечивающих выполнение современных требований к техническим характеристикам при жестких ограничениях по массе, габаритам, энергопотреблению, номенклатуре элементной базы и стоимости.

2. Разработанные теоретические методы, математические модели и алгоритмы позволяют реализовать современные требования, предъявляемые к малогабаритным мобильным радиолокационным системам обнаружения низколетящих воздушных объектов при жестких ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению.

3. Запатентованные технические решения позволили разработать ряд радиолокационных станций (Л122-1Е, 1Л122-2Е), не имеющих отечественных аналогов и не уступающих существующим зарубежным аналогам при значительно меньших массогабаритных характеристиках и потребляемой мощности.

**Внедрение результатов работы.**

Содержащиеся в диссертации результаты внедрены в радиолокационных станциях 1Л122-1Е, 1Л122-2Е, созданных и изготавливаемых АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородском научно-исследовательский институт радиотехники» (АО «ФНПЦ «НИИИРТ»). В настоящее время радиолокационные станции 1Л122Е и 1Л122-1Е серийно изготавливаются АО «ФНПЦ «НИИИРТ» и АО «ННПО имени М.В.Фрунзе». Внедрение подтверждается актами, приложенными к диссертации.

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

Обоснованность теоретических положений диссертационного исследования основывается на использовании классических методов теории вероятностей, математической статистики, статистической радиофизики, статистической радиотехники, теории матриц, теории распространения радиоволн, теории антенн, методах радиофизических измерений, цифровом спектральном анализе и теоретической радиолокации. Также, проведенные в работе исследования базируются на методах математического моделирования и натуральных экспериментах.

Достоверность результатов обеспечена экспериментальной проверкой с использованием высокотехнологичной аппаратуры и подтверждена сопоставлением результатов математического моделирования с натурными испытаниями.

Результаты согласуются с современными научными представлениями и данными, полученными при обзоре отечественных и зарубежных источников. Полученные в работе результаты подтверждаются обсуждением в публикациях в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК.

Приоритет и новизна полученных результатов подтверждена наличием действующих патентов на изобретения и полезные модели.

Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, включая международные.

### **Публикации и апробация результатов работы.**

По теме диссертации автором опубликовано 66 работ: 17 статей в изданиях, рекомендованных ВАК; 10 статей в других изданиях; 12 патентов РФ на изобретения и полезную модель; 3 монографии; 8 статей в материалах международных научных конференций; 4 статьи в материалах всероссийских научных конференций; 12 статей и тезисов докладов в сборниках трудов региональных научных конференций.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения и двух приложений. Объем диссертации составляет 376 страницы, включая 340 страниц основного текста. Список использованных источников содержит 289 наименований и приведен на 31 страницах.

### **Краткое содержание работы.**

**Введение** содержит общую характеристику работы, в частности, оценку состояния проблем создания мобильных малогабаритных низкопотенциальных активных радиолокационных систем обнаружения низколетящих воздушных объектов, вопросов обнаружения и оценки параметров радиолокационных сигналов, защиты от активных помех пассивных помех различного происхождения, распознавания летательных аппаратов с винтовым двигателем. Формулируются основные факторы при решении проблемы обнаружения низколетящих воздушных объектов и основные направления исследований. Формулируются цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание работы и ее основные результаты.

**В первом разделе** приведены результаты анализа оценки дальности действия активных радиолокационных систем при обнаружении низколетящих воздушных объектов, а также разработки методического аппарата ее оценки.

Разрабатывается математическая модель оценки эффекта интерференции радиоволн при обнаружении низколетящих воздушных объектов, которая включает в себя модель учёта поляризации антенн, модель прямой компоненты сигнала, модель квазизеркально отражённой компоненты сигнала, модель диффузно рассеянной компоненты сигнала. Разработанная модель может быть использована: при моделировании прямой трассы РЛС-объект и канала переотражения объект-РЛС; при синтезе комплексной огибающей сигнала на входах элементов антенной решетки с учетом параметров модели; в управлении диаграммой направленности приемной антенны РЛС для минимизации уровня квазизеркальной компоненты сигнала с целью уменьшения ошибки измерения угломестной координаты объектов. Проводится качественная оценка влияния интерференции радиоволн в антенных решетках при приеме радиосигналов под малыми углами места в  $L$ ,  $S$  и  $X$  частотных диапазонах.

Разрабатывается математическая модель оценки зон радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учетом их экранирования рельефом местности и местными предметами. Использование радиолокационных систем предполагает их

эксплуатацию в условиях различных макрорельефов местности. При этом, построение точных теоретических электродинамических моделей является очень сложной многофакторной задачей. Поэтому для оценки статистических закономерностей радиовидимости объектов по классам поверхностей (макрорельефов местности) представляется целесообразным построение экспериментальной феноменологической модели, предполагающей большое количество экспериментов и их статистическую повторяемость для заданного класса местности. Кроме того, в данной модели оценки дальности радиовидимости в первом приближении можно пренебречь эффектами дифракции волн на препятствиях (рельефе местности и местных предметах), создающих углы закрытия. Таким образом, данная эвристическая модель может быть сведена к геометрической модели влияние углов закрытия на дальность обнаружения низколетящего воздушного объекта. Модель строится с использованием метода статистических испытаний, позволяющего сформировать реализации ряда случайных величин: высот точек земной поверхности, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, расстояний до экранирующих низколетящие воздушные объекты местных предметов, высот экранирующих препятствий и т.д. В результате моделирования получены законы распределения дальности прямой радиовидимости и их аппроксимация в виде неполной Гамма-функции. Приведены зависимости вероятности радиовидимости целей от дальности для различных типов местности, характеризующихся средне-квадратичным отклонением (СКО) высоты неровностей подстилающей поверхности от плоскости,  $\sigma$  [м] («гладкая равнина»,  $\sigma = 5 \div 20$  м; «слегка холмистая равнина»,  $\sigma = 20 \div 40$  м; «холмистая равнина»,  $\sigma = 40 \div 80$  м; «холмы»,  $\sigma = 80 \div 150$  м; «горы»,  $\sigma = 150 \div 300$  м) для различных высот подъема антенны и высот полета целей.

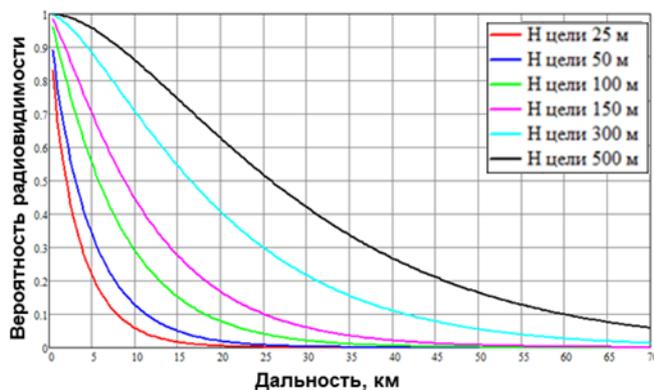


Рисунок 1.

Зависимость вероятности радиовидимости целей от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина» ( $\sigma = 20 \div 40$  м), высота фазового центра антенны 5 м.

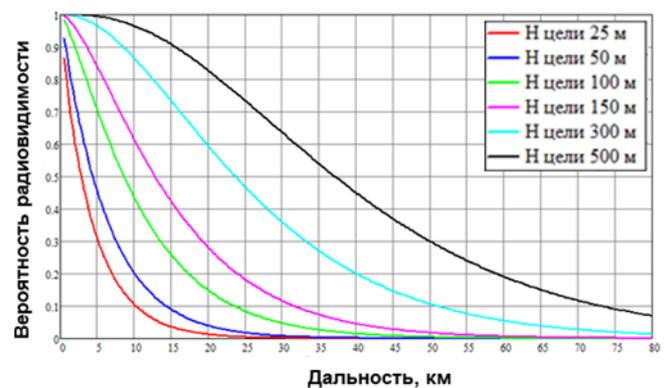


Рисунок 2.

Зависимость вероятности радиовидимости целей от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина» ( $\sigma = 20 \div 40$  м), высота фазового центра антенны 15 м.

На Рисунках 1.-2., в качестве примера приведены зависимости вероятности радиовидимости низколетящих воздушных объектов от дальности для типа местности «слегка холмистая равнина» (высота неровностей поверхности  $\sigma = 30$  м). Высота подъема фазового центра антенны 5 м (Рисунок 1.) и 15 м (Рисунок 2.), высоты полёта воздушного объекта 25 м, 50 м, 100 м, 150 м, 300 м и 500 м. Видно, что подъем антенны на высоту 12...15 м позволяет увеличить дальность обнару-

жения низколетящего воздушного объекта в среднем в 1,5...2 раза. При этом, выбор высоты фазового центра антенны 5 м обусловлен моделированием ситуации размещения антенны мобильной малогабаритной радиолокационной на транспортном средстве, а высоты 15 м – из соображений практической реализуемости антенно-мачтового устройства, обеспечивающей мобильность радиолокационной системы.

Анализ результатов моделирования позволяют сделать следующие основные выводы.

1) Подъем фазового центра антенны на высоту 12...15 м позволяет увеличить дальность обнаружения воздушного объекта:

– летящего на предельно малых высотах 25–100 м для типа местности «гладкая равнина» ( $\sigma = 5 \div 20$  м) и «слегка холмистая равнина» ( $\sigma = 20 \div 40$  м) в среднем в 2...2.5 раза;

– летящего на малых высотах 150–500 м для типа местности «гладкая равнина» ( $\sigma = 5 \div 20$  м) и «слегка холмистая равнина» ( $\sigma = 20 \div 40$  м) в среднем в 1.5 раза;

– летящего на малых высотах 150–500 м для типа местности «холмистая равнина» ( $\sigma = 40 \div 80$  м) с выбором позиции – в 1.3...1.7 раза.

2) Подъем фазового центра практически не дает прироста дальности обнаружения воздушного объекта:

– летящего на предельно малых высотах 25–100 м для типа местности «холмистая равнина» ( $\sigma = 40 \div 80$  м);

– для местности типа «холмы» ( $\sigma = 80 \div 150$  м) и «горы» ( $\sigma = 150 \div 300$  м).

3) Выбор позиции позволяет увеличить дальность обнаружения воздушного объекта;

– для типов местности «гладкая равнина» ( $\sigma = 5 \div 20$  м) и «слегка холмистая равнина» ( $\sigma = 20 \div 40$  м) в среднем в 2–2.5 раза;

– для типов местности «холмистая равнина» ( $\sigma = 40 \div 80$  м) и «холмы» ( $\sigma = 80 \div 150$  м), горы» ( $\sigma = 150 \div 300$  м) в среднем в 1.5 раза.

4) Создание мобильных радиолокационных систем с автоматическими антенно-мачтовыми устройствами является сложной инженерной задачей, и оптимальный выбор типа мачты и высоты ее подъема существенно определяет технико-экономические показатели вновь разрабатываемого изделия. Поэтому оценка и учет экранирующего действия местности имеют важную практическую значимость при проектировании мобильных радиолокационных систем с антенно-мачтовыми устройствами.

**Во втором разделе** проводится синтез системы квазиоптимальной обработки когерентной пачки импульсов, принимаемой на фоне пассивных внешних помех и собственного шума. Предлагается метод селекции движущихся целей, основанный на аппроксимации неизвестной обратной корреляционной матрицы помех матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помех.

Весовой вектор оптимальной (по критерию минимума отношения сигнал/шум) обработки определяется соотношением

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}(f) \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}$  – корреляционная матрица пассивной помехи;  $\mathbf{S}(f)$  – вектор полезного сигнала с частотой Доплера  $f$ .

Можно показать, что обратную корреляционную матрицу интенсивной помехи можно аппроксимировать матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помехи:

$$\mathbf{R}^{-1} \approx \mathbf{E} - \mathbf{P} \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица;  $\mathbf{P} = \mathbf{M}(\mathbf{M}^H \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^H$  – матрица-проектор на подпространство помехи;  $H$  – знак эрмитова сопряжения;  $\mathbf{M} = [\mathbf{S}(f_1), \mathbf{S}(f_2), \dots, \mathbf{S}(f_M)]$  – матрица, составленная из вектор-столбцов сигналов, частоты Доплера которых  $f_1, \dots, f_L$  с некоторым шагом перекрывают диапазон частот пассивной помехи.

С учетом приближения (2), оптимальный весовой вектор межпериодной обработки примет вид:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{E} - \mathbf{P})\mathbf{S}(f) \quad (3)$$

а оптимальная процедура обработки будет состоять в вычислении модуля выражения:

$$\xi = \mathbf{Y}^H (\mathbf{E} - \mathbf{P})\mathbf{S}(f_0) \quad (4)$$

где  $\mathbf{Y}$  – вектор, соответствующий принимаемому сигналу.

При этом матрица-проектор (4) выполняет функцию режектора пассивной помехи и является общей для всех доплеровских фильтров. Нули зоны режекции определяются значениями частот  $f_1, \dots, f_L$  векторов, образующих матрицу  $\mathbf{M}$  в выражении (4). Частотная характеристика отдельного проекционного доплеровского фильтра определяется выражением:

$$K_i(f) = \frac{|\mathbf{S}^H(f)(\mathbf{E} - \mathbf{P})\mathbf{S}(f_i)|}{N} \quad (5)$$

где  $N$  – количество импульсов в пакке. Синтезированы группы фильтров с различными зонами режекции, обеспечивающих обнаружение воздушных объектов в заданном диапазоне радиальных скоростей (Рисунки 3.-4.).

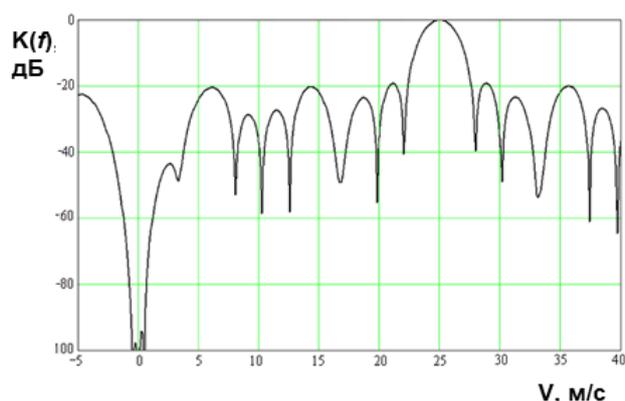


Рисунок 3.

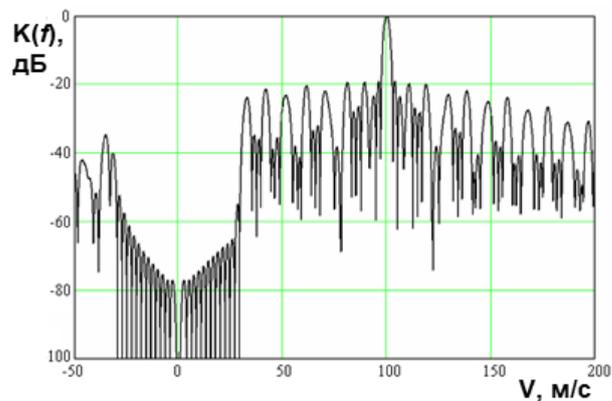


Рисунок 4.

Показана возможность адаптивного использования фильтров с различной шириной зоны режекции, что повышает эффективность предложенного метода для обнаружения малоскоростных воздушных объектов на фоне пассивных помех. Показана возможность использования предложенного метода для компенсации доплеровской составляющей в мобильных радиолокационных системах при движении транспортного носителя. Проведен синтез системы селекции движущихся целей на основе проекционного метода. Одним из существенных, с точки зрения практиче-

ской реализации, достоинств проекционного метода на основе аппроксимации корреляционной матрицы помехи матрицей проектором, по сравнению с оптимальной процедурой вычисления весового вектора, является отсутствие необходимости выполнять вычислительные процедуры, связанные с оценкой корреляционной матрицы помехи и вычислением обратной матрицы для каждого элемента разрешения в реальном масштабе времени.

В разделе систематизируются результаты исследований по оценке потерь, вносимых системой первичной обработки в обнаружение полезного сигнала: потери, связанные с дискретизацией по частоте Доплера в схемах когерентно-некогерентного и когерентного накопителей азимутального пакета; потери в накопителях азимутального пакета, связанные с многоканальностью; математическая модель оценки потерь, вносимых устройством стабилизации уровня ложных тревог, в различных схемах межпериодной обработки; потери в обнаружении, возникающие при фильтрации одиночного импульса.

Приведем пример оценки потерь, вносимых устройством стабилизации уровня ложных тревог для различных схем межпериодного накопления азимутального пакета: некогерентного накопления, когерентно-некогерентное накопления, когерентного накопления. Оценку потерь проведем для случая реализации системы стабилизации уровня ложных тревог (СУЛТ) с формированием адаптивного порога обнаружения на основе метода порядковых статистик. В качестве оценки будем использовать выборочную медиану. Как следует из полученных результатов, по мере перехода от некогерентного накопления к полностью когерентному, потери, вносимые СУЛТ, увеличиваются. Это объясняется ростом флуктуационной составляющей процесса по сравнению с его постоянной составляющей при уменьшении количества некогерентно накапливаемых импульсов. Вследствие этого, увеличиваются флуктуации оценки, что приводит к увеличению потерь. Это хорошо видно из графиков, приведенных на Рисунке 5.

Здесь показана зависимость потерь  $\Delta_{\text{СУЛТ}}$  от величины  $M$  опорного окна и количества  $N$  некогерентно накапливаемых импульсов. Видно, что с ростом  $N$  потери уменьшаются. Аналогичный эффект наблюдается при увеличении опорного окна, т.к. при этом также уменьшается флуктуационная составляющая оценки. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что выигрыш в отношении сигнал/шум при когерентном накоплении азимутального пакета может быть частич-

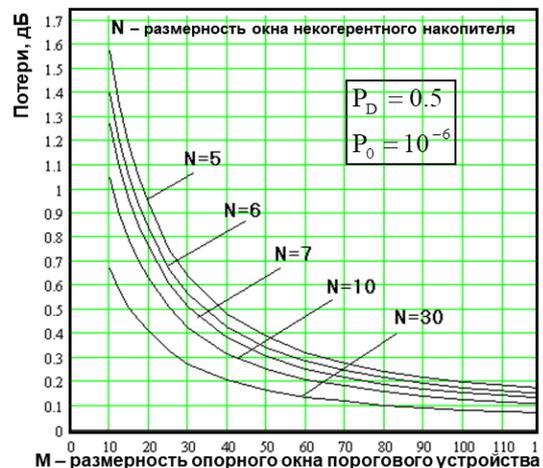


Рисунок 5.

но скомпенсирован системой стабилизации уровня ложных тревог с адаптивным порогом обнаружения при небольших значениях опорного окна (менее  $M \approx 20$ ). При этом потери могут составлять до  $1 \div 2$  дБ.

В разделе приводятся результаты натурных экспериментов и показана эффективность проекционного метода по обнаружению воздушных объектов в сложной сигнально-помеховой обстановке: малоразмерных и малоскоростных воздушных объектов на фоне отражений от местных предметов и метеообразований, а

также воздушных объектов на фоне интенсивных отражений от местных предметов - в условиях горной местности.

В качестве примера приведем результаты обнаружения радиолокационной станцией 1Л122-1Е низколетящего воздушного объекта – турбовинтового самолета на фоне горного массива в ситуации: 1) самолет взлетает с аэродрома (Рисунок 6.); 2) самолет заходит на посадку (Рисунок 7.). Высота полета от 100 до 1500 м. Максимальная дальность обнаружения составила ~30 км.

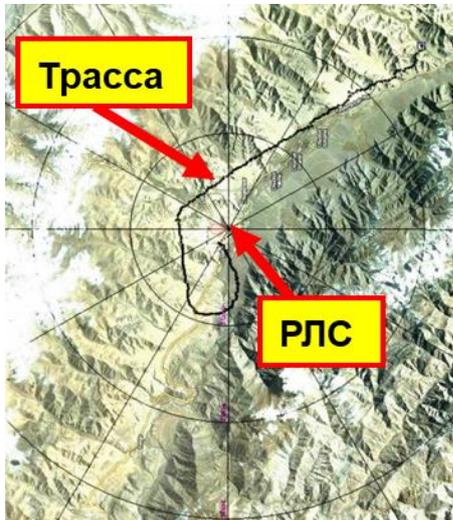


Рисунок 6.

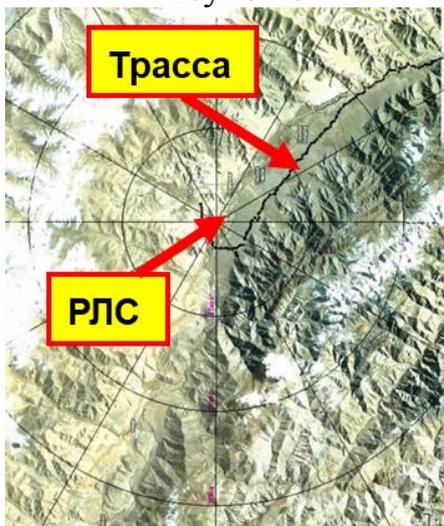


Рисунок 7.

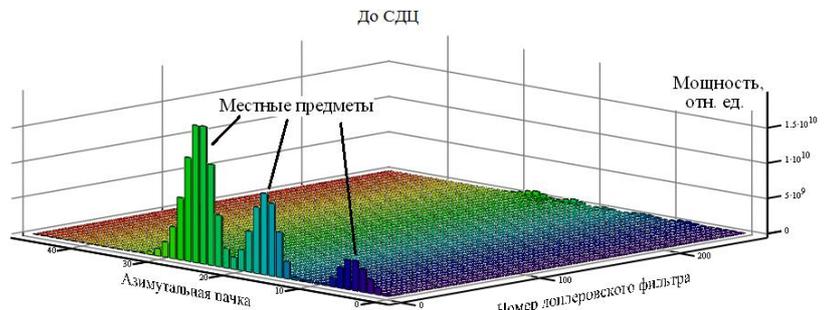


Рисунок 8.

После СДЦ

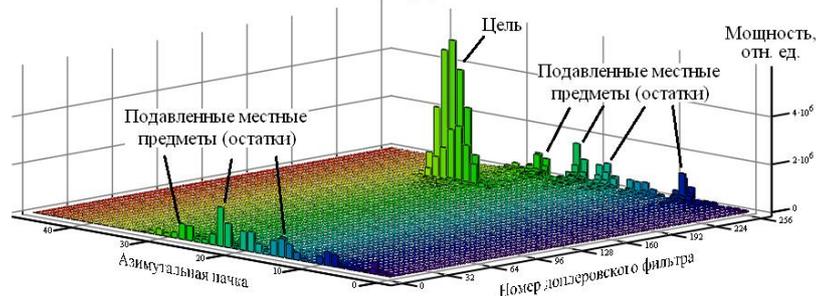


Рисунок 9.

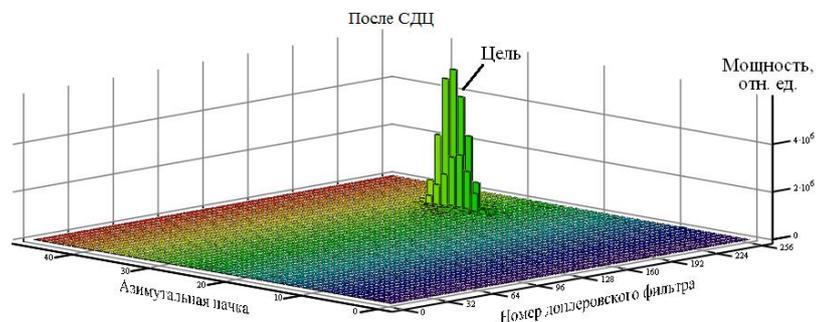


Рисунок 10.

На Рисунках 8,9. представлены результаты двумерной первичной обработки в плоскостях азимут×доплеровские фильтры до и после процедуры СДЦ соответственно. Видно, что до СДЦ азимутальная пачка от воздушной цели замаскирована сильными отражениями от местных предметов (горные массивы) и на Рисунке 10 не наблюдается. Мощность сигнала, отраженного от местных предметов, составляла не менее 55 дБ. Процедура СДЦ, использующая фильтр с частотной характеристикой с узкой полосой режекции (Рисунок 3.) позволяет выделить азимутальную пачку от цели, подавив тем самым местные предметы (Рисунок 9.). Однако, как видно из рисунка, на выходе системы СДЦ остаются некомпенсированные помехи - отражения от местных предметов (неподавленные местные предметы). Использование фильтра с более широкой полосой режекции (Рисунок 4.) позволяет полностью подавить спектральные составляющие местных предметов и провести обнаружение радиолокационной цели (Рисунок 10.).

Таким образом, синтезированная система СДЦ с использованием фильтров на основе проекционного метода с различной шириной зоны режекции позволяет провести эффективное обнаружение объектов, в том числе малоразмерных мало-скоростных и низколетящих на фоне интенсивных отражений от протяженных мест-ных предметов с коэффициентом подавления не менее 55÷60 дБ.

**В третьем разделе** рассматриваются вопросы обнаружения сигналов в усло-виях сложной сигнально-помеховой обстановки с использованием непараметриче-ских алгоритмов на основе порядковых статистик.

Приводятся анализ общих принципов формирования адаптивного порога об-наружения. Проведен анализ систем стабилизации уровня ложных тревог с адап-тивным порогом обнаружения на основе оценки квантилей статистического рас-пределения процесса. В качестве оценки порога  $Z$  используется одна из порядко-вых статистик  $x^{(i)}$ :

$$x^{(1)} \leq x^{(2)} \leq \dots \leq x^{(N)}, Z_{ПС}(x_1, \dots, x_N) = x^{(n)} \quad (6)$$

В частности, в качестве оценки адаптивного порога используется выбороч-ная медиана  $Z_{ПС}(x_1, \dots, x_N) = x^{(N/2)}$  (где  $N$  - объем обучающей выборки).

Показано, что применение метода порядковых статистик при формировании адаптивного порога обнаружения обеспечивает его безынерционность в области скачкообразного изменения помехи, а также практически полное отсутствие эф-фекта взаимной маскировки нескольких целей, одновременно находящихся в скользящем окне данных. Кроме того, уменьшаются области избыточного порога около нестационарной помехи, поскольку ее форма адекватно воспроизводится оценкой порога. Однако наряду с этим наблюдается и отрицательный эффект: на-личие ложных тревог по боковым лепесткам сигналов (например, сжатых ЛЧМ-сигналов или боковым лепесткам диаграммы направленности антенны). Таким об-разом, в области боковиков необходима коррекция порога. Такую коррекцию можно осуществить, если кроме оценки  $Z_{ПС}$  учесть еще и разброс значений про-цесса около этой оценки. В связи с этим предлагается учитывать параметр разбро-са только при наличии сильных сигналов, боковые лепестки которых соизмеримы с уровнем собственного шума на выходе некогерентного накопителя. Аппарат по-рядковых статистик позволяет это сделать, формируя оценку  $Z$  по алгоритму:

$$Z_{МПС}(x_1, \dots, x_N) = x^{(k)} + x^{(N)} f(x^{(N)}) \quad (7)$$

где  $X(N)$  – максимальная порядковая статистика,

$$f(x^{(N)}) = \begin{cases} \alpha, & x^{(N)} \geq P \\ x^{(N)} < P \end{cases} \quad (8)$$

$P$  – уровень, соответствующий главному пику минимального сигнала, боко-вики которого необходимо контролировать.

Нетрудно видеть, что при отсутствии больших значений в окне данных оценки (6) и (7) совпадают. В присутствии сильного сигнала второе слагаемое в (7) осуществляет нужную коррекцию порога в сторону увеличения. При необходимости можно провести коррекцию и в сторону уменьшения, если взять  $\alpha < 0$ . Для того, чтобы корректировать порог в интервале  $(\pm L)$  от главного пика сжатого сигнала, необходимо, чтобы длина окна удовлетворяла условию  $N > 2L$ . Параметры  $\alpha$  и  $P$  для каждого конкретного случая легко подобрать с помощью моделирования.

Проиллюстрируем особенности применения данного метода на примере тестовой сигнально-помеховой ситуации, приведенной на Рисунке 11.

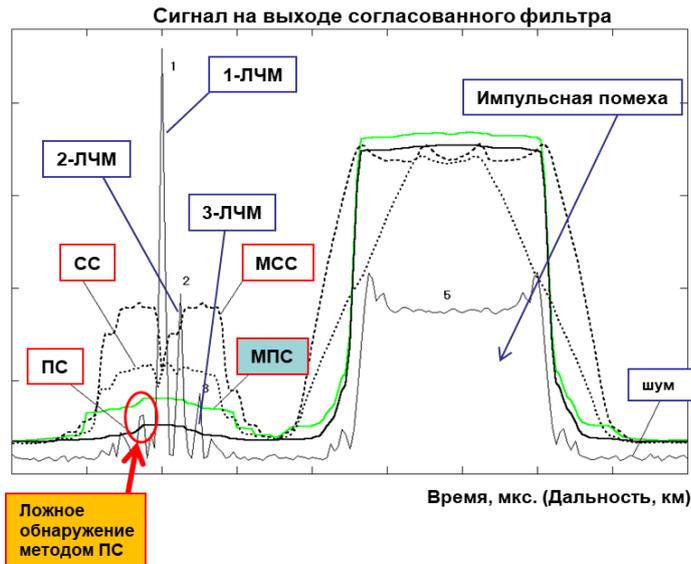


Рисунок 11.

На Рисунке 11 показан процесс на выходе некогерентного накопителя во временной области, содержащий три сжатых ЛЧМ импульса с соотношением амплитуд 1:0.5:0.3, собственный шум приемника и нестационарную помеху, представляющую собой отклик фильтра сжатия на импульсную помеху. Адаптивные пороги формируются методами скользящего среднего (СС), методом скользящего среднего с отбором максимума (МСС), методом порядковых статистик (ПС) и модифицированным методом по-

рядковых статистик (МПС). В разделе проводится анализ и синтез и системы защиты от импульсных помех с использованием оценки квантилей статистического распределения процесса. Показана возможность использования порога ограничения с использованием выборочной медианы процесса в сложной сигнально-помеховой обстановке: импульсные помехи и ЛЧМ-сигнала с различной базой.

Проведен синтез адаптивного алгоритма пеленгации источников шумовых активных помех на основе оценки квантилей статистического распределения процесса. На Рисунке 12. приведен результат моделирования для случая обнаружения трех источников шумовой активной помехи (1, 2, 3) шума с соотношением мощностей 1:0.5:0.3 и взаимным расположением по азимуту относительно друг друга.

На Рисунке 12. изображен процесс на выходе некогерентного накопителя и адаптивный порог обнаружения, сформированный методом порядковых статистик (ПС) и его модификацией (ПСМ). Порог, соответствующий оценке ПСМ надежно накрывает боковые лепестки сигнала, обеспечивая обнаружение всех трех сигналов.

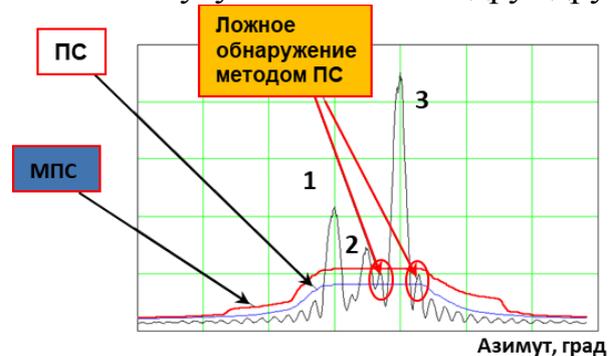


Рисунок 12.

В присутствии сильного сигнала второе слагаемое в (7) осуществляет нужную коррекцию порога в сторону увеличения.

Синтезирована система пеленгации источников шумовых активных помех с формированием порога обнаружения на основе метода порядковых статистик. Разработана математическая модель оценки чувствительности и точностных характеристик системы пеленгации шумовой активной помехи на основе метода порядковых статистик.

**В четвертом разделе** рассматриваются вопросы оценки параметров и распознавания радиолокационных сигналов, в том числе в наиболее проблемных случа-

ях, характерных для низколетящих воздушных объектов: групповых объектов, летательных аппаратов с винтовым двигателем, в том числе «зависших» (вертолеты, мультикоптеры) или летящих на встречных курсах при ракурсных углах близких к нулевым.

Традиционно задача обеспечения заданной разрешающей способности в активных радиолокационных системах решается за счет уменьшения ширины главного пика функции неопределенности. Например, за счет увеличения частоты девиации ЛЧМ-сигнала при увеличении частоты дискретизации для обеспечения разрешения по дальности и за счет увеличения линейных размеров антенной решетки для обеспечения разрешения по угловым координатам. Однако, увеличение частоты девиации модулированного сигнала (например, ЛЧМ-сигнала) и увеличение частоты дискретизации приводят к ряду дополнительных технических проблем: увеличивается объем и сложность аппаратуры формирования и приема сигналов; повышаются требования к пропускной способности каналов передачи данных; увеличиваются требования к производительности вычислительных машин.

Увеличение линейных размеров антенной решетки для обеспечения разрешения по угловым координатам в малогабаритных мобильных системах при ограничениях по массе и габаритным размерам радиоэлектронных средств также недопустимо. Переход в более коротковолновый диапазон, также приведет к существенному усложнению и увеличению объема аппаратуры. При этом решение данной задачи при помощи классических методов согласованной фильтрации одиночного импульса не представляется возможным.

Предложен алгоритм разрешения по дальности и азимуту на основе метода наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов совпадает с методом максимального правдоподобия в важном практическом случае – случае нормально распределённых процессов. В качестве примера по применению приведенного метода для разрешения радиолокационных сигналов по дальности проведено математическое моделирование разрешения по временному положению  $\Delta\tau$  двух прямоугольных импульсов с линейной частотной модуляцией, импульсы дискретизированы по времени с шагом  $1/\Delta f$ , где  $\Delta f$  – девиация частоты ( $\mu = \Delta f / T$ ). В соответствии с методом наименьших квадратов, оценки амплитуд  $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)^T$  и времени задержки  $t_3$ , т.е. дистанций  $\hat{\mathbf{D}} = (\hat{D}_1, \hat{D}_2, \dots, \hat{D}_M)$  должны обеспечить минимизацию ошибки  $E$ :

$$E = \min \left\{ \|\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}\|^2 \right\} \quad (9)$$

где  $\mathbf{y} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \mathbf{w}$ ;  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$  – вектор отсчетов наблюдаемых данных;  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$  – вектор отсчетов шума;  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)^T$  – вектор неизвестных амплитуд;  $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M)$  – вектор ЛЧМ-сигналов с дискретными значениями времени задержки радиолокационного сигнала  $\mathbf{t}_3 = (t_1, t_2, \dots, t_M)$ , соответствующими дистанции цели  $\mathbf{D} = (D_1, D_2, \dots, D_M)$ . Оценка сигнала равна  $\hat{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{S}}\mathbf{a}$ .

Вектор амплитуд  $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)^T$ , минимизирующий ошибку  $E$  для гипотетических значений дистанций  $\hat{\mathbf{D}} = (\hat{D}_1, \hat{D}_2, \dots, \hat{D}_M)$  (и, следовательно,  $\hat{\mathbf{S}}$ ) для линейной задачи наименьших квадратов, определяется выражением:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\hat{\mathbf{S}}^H \hat{\mathbf{S}})^{-1} \hat{\mathbf{S}}\mathbf{y} \quad (10)$$

Для этого вектора минимальное значение  $E$  :

$$\min(E_1) = \mathbf{y}^H \mathbf{y} - \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{y}} \quad (11)$$

Теперь следует минимизировать  $E_1$  по всем возможным значениям и, следовательно, по всем возможным значениям  $\hat{\mathbf{S}}$ . Минимизация  $E_1$  эквивалентна максимизации величины  $E_2$ , равной

$$\max(E_2) = \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{S}} (\hat{\mathbf{S}}^H \hat{\mathbf{S}})^{-1} \hat{\mathbf{S}}^H \mathbf{y} \quad (12)$$

На Рисунке 13. приведены результаты моделирования, которые дают зависимость нормированной к величине  $1/\Delta f$  (рэлеевский предел) разрешающей способности от отношения сигнал-шум на входе системы обработки. Приведенная зависимость соответствует вероятности правильного разрешения двух сигналов 0,9. Моделирование проводилось для ЛЧМ-сигналов с различными значениями базы  $B$ . Из Рисунка 13. видно, что приведенный алгоритм на основе метода наименьших квадратов позволяет значительно улучшить разрешение, обеспечиваемое согласованной фильтрацией. Так, даже при относительно небольших параметрах базы ЛЧМ сигнала ( $B = 10$ ), разрешение групповой цели, по сравнению с релеевским разрешением, увеличивается в  $\approx 1.5$  раза ( $\Delta\tau \cdot \Delta f \approx 0.7$ ), а для сигналов с базой  $B = 50 \div 100$  – в 2-2.5 раза ( $\Delta\tau \cdot \Delta f \approx 0.5$  и  $\Delta\tau \cdot \Delta f \approx 0.4$  соответственно). Важным преимуществом предложенного алгоритма разрешения является возможность его распространения на модель сигнала с произвольным количеством целей. При этом, также будет обеспечиваться оценка параметров радиолокационного сигнала от групповой цели.

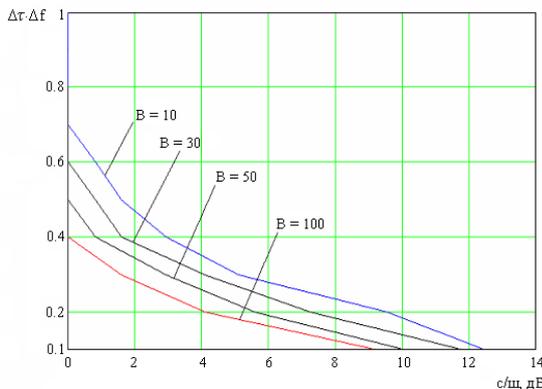


Рисунок 13.

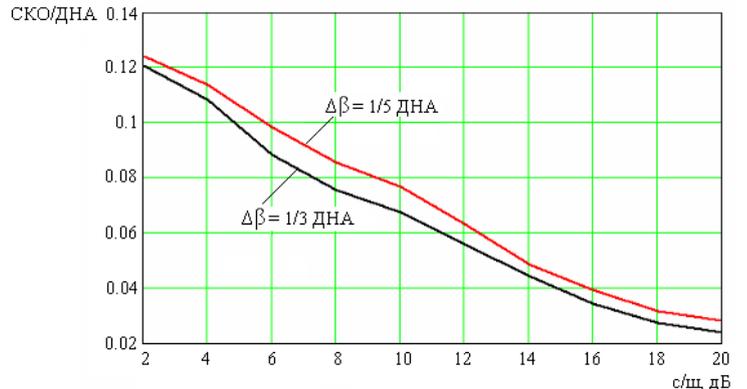


Рисунок 14.

На Рисунке 14. приведены результаты моделирования, которые показывают зависимость нормированной к ширине диаграммы направленности антенны (ДНА) в азимутальной плоскости ( $1/\text{ДНА}$ ) среднеквадратичного отклонения (СКО) оценки измерения (суммарной) азимута двух целей от отношения сигнал-шум на входе системы обработки. В этом случае в выражении (10) матрица  $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M)$  будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{S}_k^T = \begin{bmatrix} f(\beta_k) \exp(j2\pi F_k^d 1T) \\ \dots \\ f(\beta_k) \exp(j2\pi F_k^d NT) \end{bmatrix}, k = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

где  $f(\beta)$  – функция ДН антенны в азимутальной плоскости,  $F_k^d$  – частота Доплера  $k$ -го источника,  $N$  – длина азимутального пакета.

Моделирование проводилось для случая суммы двух сигналов с различием в частоте Доплера соответствующим 3 м/с. Показаны результаты измерения суммарного СКО при разнесении целей по азимуту на 1/3 ширины ДНА (черная линия) и на 1/5 ширины ДНА (красная линия). Из рисунка 14. видно, что совместная оценка азимута групповой цели будет ограничена СКО измерения одиночного сигнала, которое составляет  $\sim 1/10$  ДНА.

В разделе проводится анализ и синтез системы распознавания радиолокационных сигналов с использованием признаков пропеллерной модуляции сигнала при отражении от лопастей несущего винта. Показано, что при работе активной импульсной радиолокационной системы с высоким темпом обзора пространства (менее 1-2 с.) за время облучения объекта в азимутальном пакета из-за узкой обратной диаграммой направленности может наблюдаться  $\sim 1-3$  импульса, отраженных от винтов вертолета на фоне интенсивных отражений от корпуса (планерной составляющей). Таким образом, построение доплеровского спектра сигнала, отраженного от винтов, при его короткой выборки, не всегда представляется возможным. Предлагается алгоритм обнаружения и классификации вертолетов, основанный на процедуре выделения и обработки зондирующего радиосигнала, отраженного лопастями несущего винта.

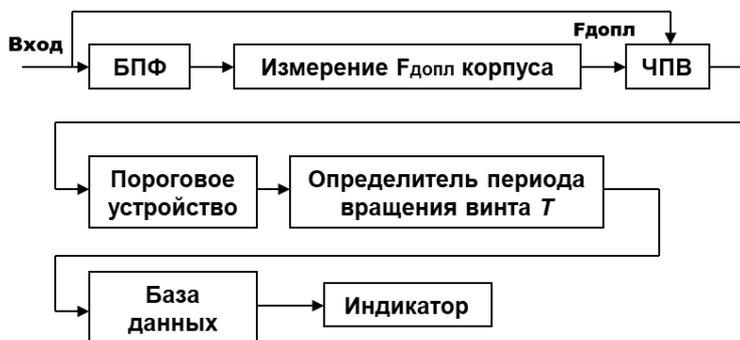


Рисунок 15.

Очевидно, что модель сигнала, отраженного от вертолета, можно представить в виде суммы сигналов, отраженных от корпуса и винтов. Входной сигнал в цифровой виде поступает на устройство БПФ и на основании полученного доплеровского спектра находится скорость движения корпуса вертолета относительно РЛС (в блоке «Измерение  $F_{\text{допл}}$  корпуса»), которая используется для компенсации сигнала, отраженного от корпуса в устройство ЧПВ (череспериодное вычитание). Далее сигнал подается на пороговое устройство, в котором реализуется определение максимального значения амплитудной модуляции в обработанном сигнале. Если наблюдаются существенные пики сигнала, то это свидетельствует о наличии вертолета. По полученному сигналу определяем период амплитудной модуляции, сравнивается со значением базы данных, в которой заложены характеристики вертолетов (скорости вращения главного винта), и, проводя сравнительный анализ, на основании полученных значений на индикатор выводится модель вертолета.

В разделе приведены результаты исследований по оценке возможности использования методов сверхразрешения для выявления признаков пропеллерной модуляции при обнаружении воздушных объектов с винтовым двигателем при малых ракурсных углах наблюдения. Особенность обнаружения пропеллерной модуляции в радиолокационных сигналах, отраженных от самолетов с винтовым двигателем, заключается в том, что скорость вращения винтов самолетов на порядок превышает скорость вращения винтов вертолетов, что позволяет выделять сигналы,

отраженные от лопастей винта для РЛС кругового обзора с высоким темпом обзора за счет построения доплеровского спектра. С другой стороны, при движении летательного аппарата в радиальном направлении к РЛС, обнаружение сигналов, отраженных от винтов будет происходить при малых ракурсных углах (близких к нулевым), т.е. сдвиг доплеровской частоты сигнала будет минимальным и обнаружение эффекта пропеллерной модуляции классическими методами спектрального разрешения, основанных на дискретном преобразовании Фурье, как правило, не всегда представляется возможным. Можно повысить разрешающую способность локатора за счет применения мощных передающих устройств, увеличения размера полотна антенной решетки и расширения полосы сигнала. Это приведет к увеличению массогабаритных параметров аппаратуры передачи и обработки сигналов, повышению требований к вычислительным процессорам и пропускной способности каналов. Но данный подход является неприемлемым для малогабаритных мобильных радиолокационных систем обнаружения низколетящих объектов, где всегда существуют жесткие ограничения по массе и габаритным размерам, которые исключают дальнейшее увеличение разрешающей способности за счет изменения параметров диаграммы направленности антенны и аппаратуры обработки сигналов. Однако современные методы цифрового спектрального оценивания, в том числе так называемые методы «сверхразрешения», дают возможность наблюдать эффект пропеллерной модуляции и при малых ракурсных углах. Проведен анализ методов «сверхразрешения»: метода классификации множественных сигналов (MUSIC) и авторегрессионного метода прямого-обратного линейного предсказания (ПОЛП) для обнаружения спектральных составляющих, обусловленных вращением воздушного винта летательного аппарата. Приведены результаты натурных экспериментов по обнаружению спектральных составляющих, обусловленных вращением воздушного винта летательного аппарата, с применением методов MUSIC и ПОЛП.

Проведен синтез системы распознавания винтовых летательных аппаратов на основе авторегрессионного метода прямого-обратного линейного предсказания (Рисунок 17.)

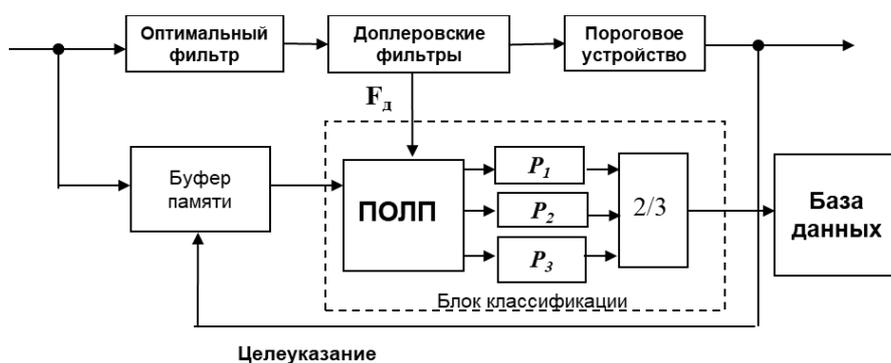


Рисунок 16.

Система содержит оптимальный фильтр, блок доплеровских фильтров, пороговое устройство (ПУ), буфер памяти, блок классификации и блок базы данных. Блок классификации содержит устройство формирования авторегрессионной оценки по методу прямого-обратного линейного предсказания (ПОЛП), набор из трех фильтров предсказания ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) и блок выбора по критерию «два из трех».

На Рисунке 17. приведены результаты спектрального анализа сигналов, отраженных от летящих на встречных курсах самолета с винтовым двигателем Як-52 и реактивного самолета МиГ-29. Использование методов спектрального сверхраз-

решения (ПОЛП и MUSIC) позволяют наблюдать в случае самолета с винтовым двигателем Як-52 дополнительные спектральные компоненты, обусловленные вторичной (пропеллерной) модуляцией. Показано, что предложенная методика позволяет повысить вероятность распознавания винтовых летательных аппаратов, летящих на встречных курсах в среднем с 50% до 90% по сравнению с классическим алгоритмом, основанным на дискретном преобразовании Фурье.

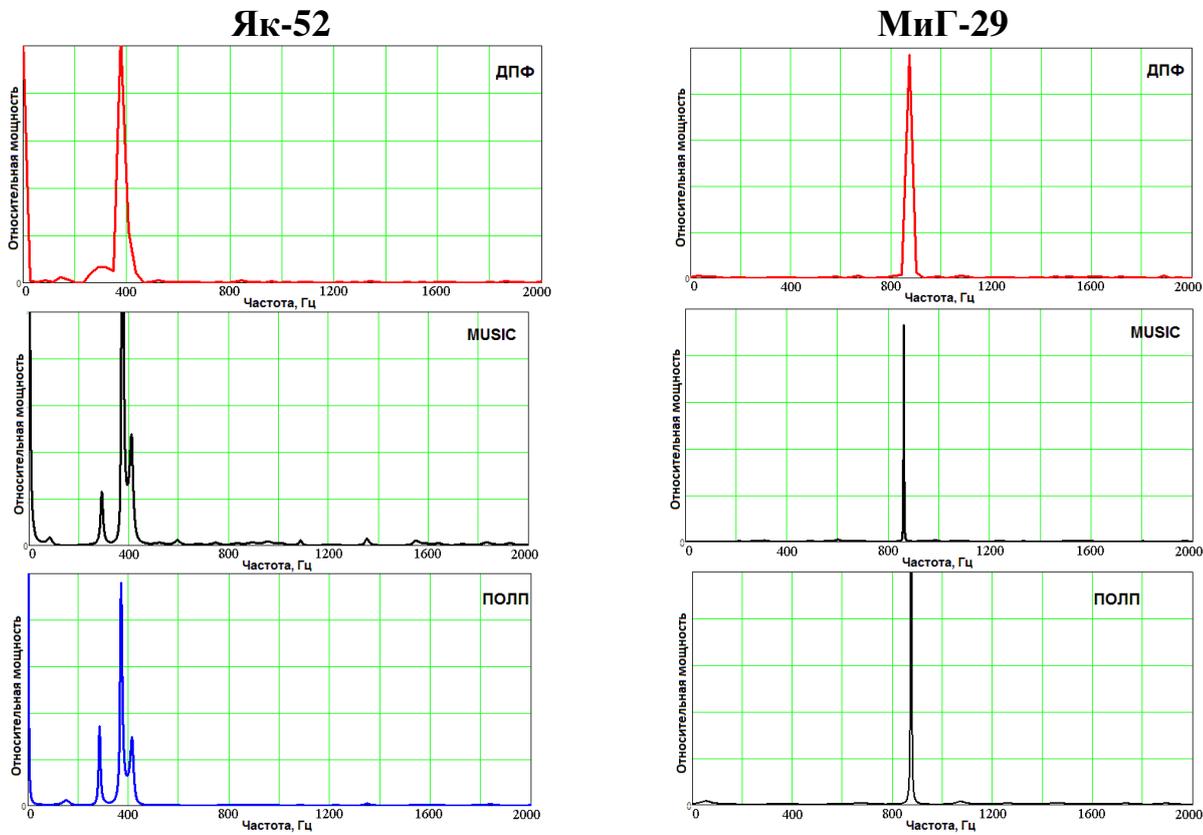


Рисунок 17.

**В пятом разделе** проведен синтез системы компенсации шумовой активной помехи в условиях нестационарной помеховой обстановки.

Проводится анализ проблемы нестационарности при синтезе системы компенсации шумовых помех. Известные методы компенсации позволяют успешно разрабатывать радиолокационные системы для стационарной помеховой обстановки. Однако, в реальных условиях работы радиолокационных систем приходится иметь дело с нестационарной помеховой обстановкой, что объясняется рядом факторов. Одним из основных факторов нестационарности является перемещение радиолокационных объектов наблюдения, связанное с динамикой их движения, а также перемещение локатора на подвижном объекте. Нестационарность вызывается также режимом обзора радиолокационной системы, так как в процессе обзора изменяются угловые соотношения между лучом антенны и постановщиком помех, а, следовательно, и угловое положение нулей диаграммы направленности относительно максимума основного лепестка. Это означает, что нестационарность связана с эффектом несоответствия параметров весовых коэффициентов автокомпенсатора пространственному положению диаграммы направленности антенны и источника помехи, связанным с вращением антенны радиолокационной системы (т.н. «устаревание» параметров весовых коэффициентов АК). В радиолокаторах

средней и большой дальности (как правило, это соответствует дальности обнаружения 300-500 км) временной интервал между двумя зондирующими импульсами позволяет проводить настройку АК (вычисление весовых коэффициентов) перед началом очередного такта зондирования. Настройка коэффициентов АК в так называемом «конце дистанции» исключает попадание (или делает ничтожно малой вероятностью) в обучающую выборку сигналов, отраженных от местных предметов, метеообразований, а также сигналов, отраженных от воздушных объектов. В радиолокаторах с малым межимпульсным интервалом зондирования (радиолокаторы малой дальности), при наличии небольшого количества дискретов дальности вычисление весовых коэффициентов АК приходится осуществлять в специальных служебных зонах, в которых радиолокатор не излучает, а работает только на прием. Фактически это означает потерю полезной информации, что приводит к потерям в обнаружении и ухудшению качества межпериодной обработки за счет расширения доплеровских фильтров и увеличения уровня их боковых лепестков. Однако, чем больше временной интервал между служебными зонами, тем меньше будет среднее подавление ШАП из-за рассогласования параметров коэффициентов АК. Поэтому для радиолокационных систем малой дальности актуальной становится задача выбора оптимального, с точки зрения комплексной реализации систем АК ШАП и межпериодной обработки, временного интервала между служебными зонами.

Таким образом, проблема влияния нестационарной помеховой обстановки на систему компенсации шумовых активных помех особенно актуальна в радиолокационных системах малой дальности и обнаружения низколетящих воздушных объектов.

В разделе синтезирован алгоритм линейной интерполяции коэффициентов настройки автокомпенсации шумовых активных помех трехканального компенсатора с непосредственным обращением корреляционной матрицы помех.

Интерполяция коэффициентов проводится во временном интервале работы автокомпенсатора между служебными зонами, где осуществляется вычисление коэффициентов. На Рисунке 18. показана зависимость коэффициента подавления помехи от угла перемещения постановщика ( $\beta_{СЗ}$ ). Видно что, при перемещении помехопостановщика на угол, соответствующий 1/3 диаграммы направленности антенны ( $\beta_{СКАН} / \beta_{ДНА} = 0.3$ ), коэффициент подавления помехи снижается до нуля.

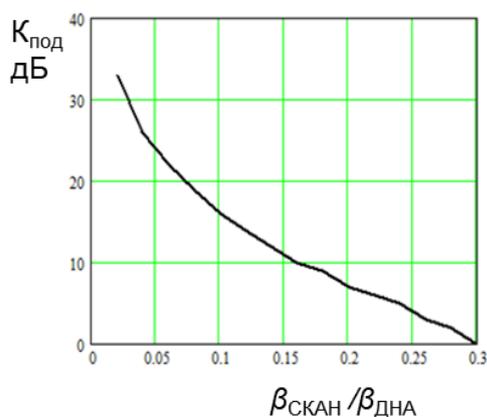


Рисунок 18.

Зависимость коэффициента подавления помехи от угла перемещения постановщика.

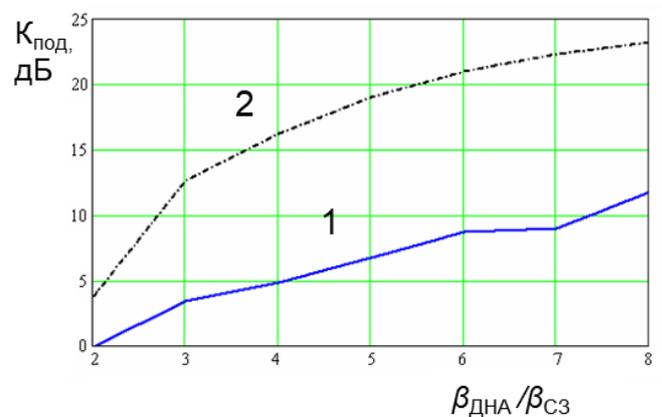


Рисунок 19.

Зависимость коэффициента подавления шумовой активной помехи от величины интервала между служебными зонами.

На Рисунке 19. показаны результаты моделирования зависимости коэффициента подавления ШАП ( $K_{\text{под}}$ ) от величины интервала между служебными зонами по отношению к ширине диаграммы направленности антенны основного канала (кривая 1 - без линейной интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовых активных помех; кривая 2 - с линейной интерполяцией весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовых активных помех;  $\beta_{\text{ДНА}}$  – ширина диаграммы направленности антенны основного канала по уровню минус 3 дБ;  $\beta_{\text{СЗ}}$  – интервал между служебными зонами).

Результаты моделирования показали, что без использования процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов коэффициент подавления ШАП в среднем не превышает 15 дБ. Использование процедуры линейной интерполяции весовых коэффициентов позволяет увеличить коэффициент подавления ШАП в среднем на 5-10 дБ. Важно отметить, что данная зависимость позволяет решить задачу комплексной реализации систем АК ШАП и межпериодной обработки. То есть, за счет выбора оптимального количества служебных зон, с одной стороны, обеспечивается требуемый коэффициент подавления ШАП, а с другой стороны, обеспечиваются минимальные потери при обнаружении сигнала системой межпериодной обработки.

Также в разделе приведены результаты натуральных экспериментов, показывающие возможность применения предложенного метода линейной интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора в реальной сигнально-помеховой обстановке. Анализ экспериментальных данных подтвердил увеличение коэффициента подавления ШАП при использовании линейной интерполяции (по сравнению с алгоритмом без интерполяции) в среднем на 5 дБ.

**В шестом разделе** приведены результаты исследований возможности использования оценки количественной меры степени когерентности радиолокационных сигналов для распознавания имитирующих сигналоподобных радиопомех.

Проводится анализ методов защиты от одного из основных типов интеллектуальных помех – активных имитирующих сигналоподобных радиопомех. Показан ряд общих недостатков существующих методов защиты существенно снижающих их эффективность. Варианты построения радиотехнических систем, формирующих имитирующие сигналоподобные радиопомехи весьма разнообразны, однако в основе таких систем построения лежит принцип ретрансляции зондирующего сигнала с измененными параметрами, несущими информацию о координатах и скорости объекта. Особенно стоит подчеркнуть важность рассмотрения помех данного класса и методов защиты от них в рамках проблемы обнаружения низколетящих воздушных объектов. Это объясняется тем, что наиболее перспективным направлением технической реализации радиосистем – помехопостановщиков является их размещение на БПЛА различных классов, которые действуют на малых и сверхмалых высотах.

Предлагается метод селекции имитирующих сигналоподобных радиопомех, основанный на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов.

Рассмотрим меру когерентности сигналов как энтропию распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы:

$$H = - \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \log \lambda_{0i} , \quad (14)$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_N$  – собственные значения корреляционной матрицы сигнала.

На Рисунке 20. приведён график зависимости значений энтропии аддитивной смеси детерминированного синусоидального сигнала и белого шума от отношения сигнал-шум (ОСШ). Размер оценочной корреляционной матрицы  $N = 130$ , количество усреднений по выборке равно  $N$ .

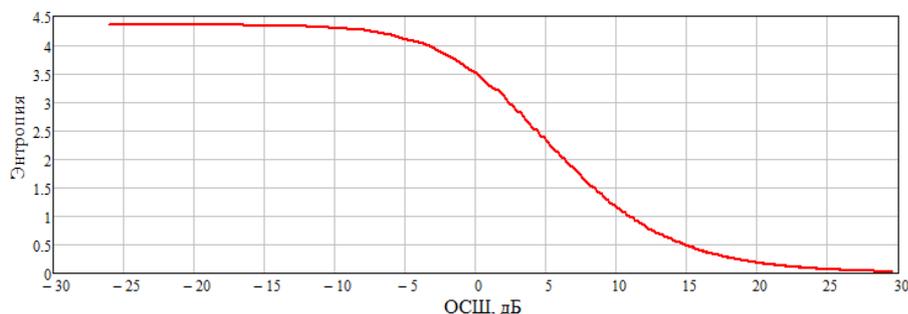


Рисунок 20.

Теоретическая зависимость значений энтропии от ОСШ для аддитивной смеси детерминированного сигнала и белого шума.

Получены зависимости значений энтропии сигналов от длины выборки и значений энтропии сигналов для группового объекта. На Рисунке 21. показаны графики зависимостей значений энтропии от разницы угловых направлений  $\Delta\varepsilon = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$  векторов сигналов двух волновых фронтов  $\mathbf{S}(\varepsilon_1)$  и  $\mathbf{S}(\varepsilon_2)$

Из Рисунка 21. видно, что в соответствие с выражением (14) энтропия распределения энергии сигнала монотонно возрастает, достигая своего максимального значения  $H = \ln 2 = 0.693$  при значениях  $\Delta\varepsilon \sim 1/N$ , т.е. принимаемые фронты ортогональным. Это показывает возможность использования метода при обнаружении нескольких близкорасположенных воздушных объектов при условии ортогональности волновых фронтов.

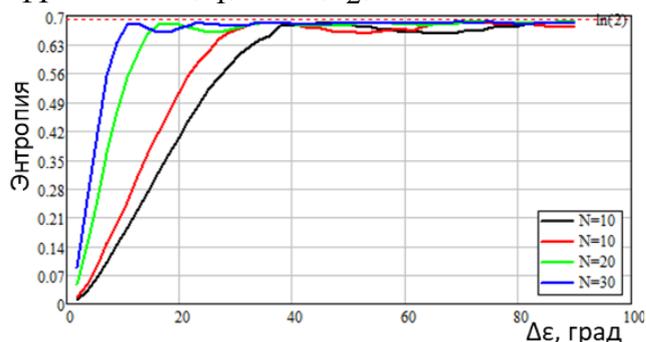


Рисунок 21.

Зависимость значений энтропии от направления угловых фронтов.

Приведены результаты натуральных экспериментальных исследований по селекции низколетящих воздушных объектов на фоне сигналоразличной помехи с использованием различных типов летательных аппаратов (с винтовым двигателем и турбореактивных) и специализированной аппаратуры - ретранслятора имитирующих сигналоразличных радиопомех. В качестве реальных воздушных объектов использовались: легкомоторный пропеллерный самолет Як-52, вертолет Robinson R44, самолет МиГ-29 и БПЛА Vanshee. В качестве системы регистрации радиолокационной информации использовались три обзорные трехкоординатные доплеровские радиолокационные станции дециметрового диапазона волн 1Л122-1Е. Регистрировались, для последующего анализа, данные с выхода системы межпериодной временной обработки в виде азимутальных пачки на  $M=256$  дискретных отчетов. Размерность оценочной корреляционной матрицы для рассматриваемого метода составляла  $N=130$ . Оценивание меры когерентности для зарегистрирован-

ных сигналов проводилось в соответствии с выражением (14). Рисунок 22. наглядно показывает расхождение полученных значений для истинных и ложных эхосигналов.

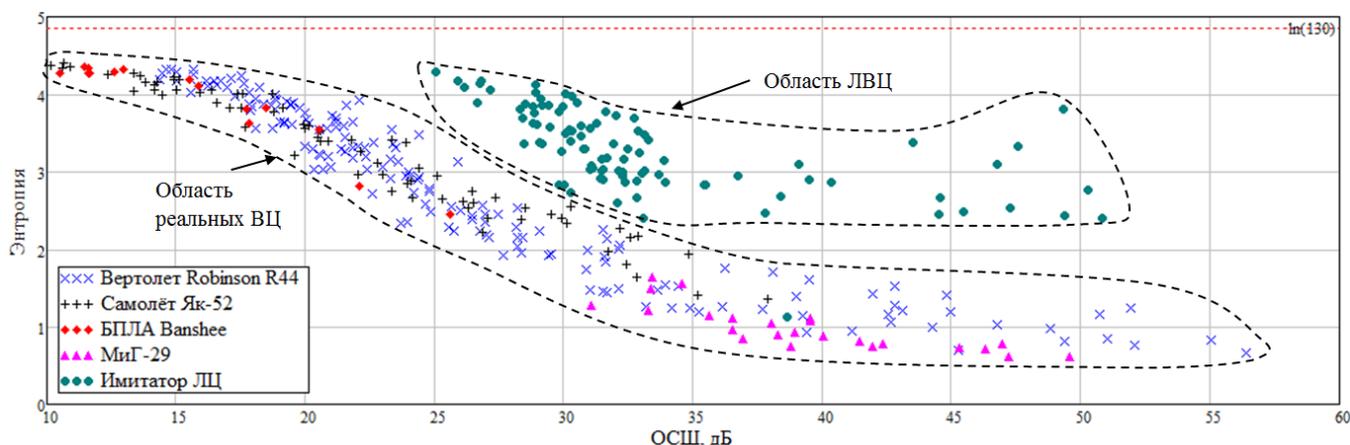


Рисунок 22.

Обнаруженный в ходе экспериментальных исследований эффект различая степени когерентности сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов, и сигналов помехи, подтвердил возможность распознавания (селекции) активной имитирующей сигналоподобной радиопомехи.

Проведен синтез системы селекции имитирующих помех в составе первичной обработки когерентно-импульсной активной радиолокационной системы. Показано, что основное достоинство предлагаемого метода, по сравнению с существующими, состоит в том, что он позволяет повысить помехозащищённость радиоэлектронных систем от активных имитирующих помех, используя алгоритмические способы первичной обработки радиолокационных сигналов, не прибегая к изменению параметров диаграммы направленности антенны, поляризации антенны, вида и типа зондирующего импульса, схемы приёмо-передающего тракта и массогабаритных характеристик.

**В седьмом разделе** приведены основные характеристики малогабаритных мобильных радиолокаторов обнаружения низколетящих воздушных объектов новейшей отечественной разработки 1Л122-1Е и 1Л122-2Е (Рисунок 23.).



Рисунок 23.

а) РЛС 1Л122-1Е; б) РЛС 1Л122-1Е на гусеничном шасси; в) РЛС 1Л122-2Е

Радиолокационные станции 1Л122-1Е и 1Л122-2Е – это трехкоординатные когерентно-импульсные РЛС кругового обзора, работающие в дециметровом диапазоне длин волн ( $L$  – частотный диапазон), с твердотельным передатчиком, с цифровой фазированной антенной решеткой. Применение антенно-мачтового устройства (АМУ) позволяет поднимать антенну РЛС 1Л122-2Е на высоту до 10 м, что позволяет выделить следующие особенности применения: работа в укрытии, лесистой и холмистой местности, складках ландшафта и т.д.; улучшение характеристики обнаружение воздушных целей на малых и предельно малых высотах 50-500 м на дальностях порядка 30 км; при сложенном АМУ возможна работа РЛС в движении.

Проведен сравнительный анализ отечественных и зарубежных активных мобильных низкопотенциальных радиолокационных станций обнаружения низколетящих объектов. Результаты сравнительного анализа основных характеристик данных радиолокаторов и перспективных зарубежных аналогов показывают, что соответствуя зарубежным образцам, РЛС 1Л122-1Е и 1Л122-2Е превосходят зарубежные по ряду основных характеристик (пределы работы по дальности, высоте, массе, габаритам, энергопотреблению).

Техническая реализация и выполнение современных требований в радиолокационных системах 1Л122-1Е и 1Л122-2Е возможно только при сочетании конструктивных, технологических решений и использовании современной вычислительной техники с оптимальными (квазиоптимальными) методами обработки, разрабатываемыми, в том числе, в данном диссертационном исследовании.

В разработанных РЛС 1Л122-1Е и 1Л122-2Е были реализованы и внедрены следующие результаты диссертационной работы:

- метод синтеза весового вектора квазиоптимальной межпериодной фильтрации пачки импульсов с использованием ортогонального проектирования;
- математическая модель и методика оценки зон радиовидимости низколетящих целей с учетом их экранирования макрорельефом местности и местными предметами;
- алгоритмы распознавания радиолокационных сигналов с использованием признаков пропеллерной модуляции;
- алгоритм пеленгации источников шумовых активных помех на основе метода порядковых статистик;
- алгоритм интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора шумовых активных помех;
- методика расчета потерь при обнаружении полезного сигнала в тракте цифровой обработки РЛС.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

### **Основные результаты работы.**

1. Разработана математическая модель оценки зон радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учетом их экранирования рельефом местности и местными предметами. Приведены зависимости вероятности радиовидимости целей от дальности для различных типов местности («гладкая равнина», «слегка холмистая равнина», «холмистая равнина», «холмы», «горы») для различных значений высот подъема антенны. Показано, что подъем антенны на высоту 12...15 м позво-

ляет увеличить дальность обнаружения низколетящего воздушного объекта для местности типа «слегка холмистая равнина» и «холмистая равнина» в среднем в 1.5...2 раза, типа «холмы» – в 1.3...1.7 раза.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден предложенный метод селекции движущихся целей, основанный на аппроксимации неизвестной обратной корреляционной матрицы помех матрицей-проектором на подпространство, ортогональное подпространству помех. Синтезированы группы фильтров с различными зонами режекции, обеспечивающих обнаружение воздушных объектов в заданном диапазоне радиальных скоростей. Показана возможность адаптивного использования фильтров с различной шириной зоны режекции для обнаружения малоскоростных воздушных объектов на фоне пассивных помех. Показана возможность использования предложенного метода для компенсации доплеровской составляющей при движении транспортного носителя в мобильных системах. Приведены результаты натурных экспериментов и показана возможность применения проекционного метода по обнаружению воздушных объектов в сложной сигнально-помеховой обстановке: малоразмерных и малоскоростных воздушных объектов на фоне отражений от местных предметов и метеообразований, а также воздушных объектов на фоне интенсивных отражений от местных предметов - в условиях горной местности. Показано, что созданная система СДЦ с использованием фильтров на основе проекционного метода с различной шириной зоны режекции позволяет провести эффективное обнаружение объектов, в том числе на фоне интенсивных отражений от протяженных местных предметов с коэффициентом подавления не менее 55÷60 дБ.

3. Разработана математическая модель оценки потерь, вносимых системой первичной обработки в обнаружение полезного сигнала, позволяющая повысить достоверность оценки и теоретического обоснования основных технических характеристик активных импульсных радиолокационных систем.

4. Дана оценка возможности использования непараметрических алгоритмов на основе порядковых статистик при обнаружении сигнала в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки - маскировки слабого сигнала интенсивной помехой и взаимной маскировки нескольких сигналов, одновременно находящихся в скользящем окне данных. Приведены результаты развития метода порядковых статистик, учитывающего флуктуационную составляющую адаптивного порога. Приведены результаты моделирования системы защиты от импульсных помех. Показано преимущество порога ограничения с использованием выборочной медианы процесса в сложной сигнально-помеховой обстановке: импульсные помехи и ЛЧМ-сигнала с различной базой. Синтезирована система пеленгации источников шумовых активных помех с формированием порога обнаружения на основе метода порядковых статистик.

5. Обосновано использование метода наименьших квадратов для синтеза алгоритмов разрешения по дальности и азимуту, обеспечивающих разрешение и оценку параметров радиолокационных сигналов. Приведены результаты моделирования показывающие, что алгоритмы разрешения на основе МНК позволяют значительно улучшить разрешение, обеспечиваемое согласованной фильтрацией - «релеевское» разрешение. Показано, что предложенный алгоритм разрешения распространяется на модель сигнала с произвольным количеством объектов, при этом, обеспечивается оценка параметров целей.

6. Обоснована методика обнаружения воздушных объектов с винтовым двигателем в радиолокационных системах с высоким темпом обзора пространства за счет использования признаков пропеллерной модуляции. Проведенный анализ радиолокационных систем при разных темпах обзора по распознаванию различных моделей винтовых летательных аппаратов показывает возможность не только распознать, но и определить модель летательного аппарата.

7. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность использования методов спектрального сверхразрешения для выявления признаков пропеллерной модуляции при обнаружении воздушных объектов с винтовым двигателем при малых ракурсных углах. Приведены результаты натурных экспериментов по обнаружению спектральных составляющих, обусловленных вращением воздушного винта летательного аппарата с применением проекционного метода MUSIC и метода прямого-обратного линейного предсказания. Проведено сравнение доплеровских портретов сигналов, отраженных от различных типов летательных аппаратов: винтовых и реактивных. Показано, что предложенная методика позволяет повысить вероятность распознавания винтовых летательных аппаратов, летящих на встречных курсах (при малых ракурсных углах наблюдения) в среднем с 50% до 90% по сравнению с классическим алгоритмом, основанным на дискретном преобразовании Фурье.

8. Синтезирована система автокомпенсации шумовых активных помех в условиях нестационарной помеховой обстановки. Показано, что эффективность компенсации активных помех существенно снижается в случае нестационарной помеховой обстановки, обусловленной несоответствием параметров весовых коэффициентов автокомпенсатора пространственному положению диаграммы направленности антенны и источника помехи при вращении антенны радиолокационной системы. Предложен алгоритм работы автокомпенсатора, основанный на процедуре линейной интерполяции коэффициентов настройки. 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. Получена зависимость коэффициента подавления от величины временного интервала между зонами вычисления коэффициентов настройки автокомпенсатора. Приведены результаты натурных экспериментов, показывающие возможность использования предложенного метода линейной интерполяции весовых коэффициентов автокомпенсатора в реальной сигнально-помеховой обстановке.

9. Синтезирована система селекции имитирующих сигналподобных радиопомех, основанная на оценке когерентных свойств радиолокационных сигналов. В качестве селектирующего признака предложена мера когерентности сигналов как энтропия распределения энергии сигнала по собственным подпространствам его корреляционной матрицы. Получены зависимости значений энтропии сигналов от длины выборки и значений энтропии сигналов для группового объекта. Приведены результаты натурных экспериментальных исследований с использованием различных типов летательных аппаратов (с винтовым двигателем и турбореактивных) и специализированной аппаратуры - ретранслятора имитирующих сигналподобных радиопомех. Обнаруженный в ходе экспериментальных исследований эффект различая степени когерентности сигналов, отраженных от реальных воздушных объектов, и сигналов помехи, подтвердил возможность распознавания (селекции) ак-

тивной имитирующей сигналоподобной радиопомехи. Проведен синтез системы селекции имитирующих радиопомех в составе первичной обработки когерентно-импульсной активной радиолокационной системы.

10. Приведены основные характеристики радиолокаторов новейшей отечественной разработки 1Л122-1Е и 1Л122-2Е, выполненных путем реализации комплексного системного подхода при синтезе алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов. Приведен сравнительный анализ основных характеристик отечественных и зарубежных активных малогабаритных мобильных низкочастотных радиолокационных станций обнаружения низколетящих объектов. Показано, что соответствуя зарубежным образцам, РЛС 1Л122-1Е и 1Л122-2Е превосходят зарубежные по ряду основных характеристик (пределы работы по дальности, высоте, массе, габаритам, энергопотреблению). Показано, что техническая реализация и выполнение современных требований в радиолокационных системах 1Л122-1Е и 1Л122-2Е, возможно только при сочетании конструктивных, технологических решений и использовании современной вычислительной техники с оптимальными (квазиоптимальными) методами обработки, предложенными, в том числе, в данном диссертационном исследовании.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Михеев П.В., Фитасов Е.С. Близкий к оптимальному способ доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов // Вестник Нижегородского государственного университета. Серия: Радиофизика. 2005. Вып. 1 (3). С. 67–72. (0.38 п.л./0.19 п.л.);
2. Метод распознавания и классификации летящих и зависших вертолетов / Е.С. Фитасов и [др.] // Вестник Нижегородского государственного университета. Серия: Радиофизика. 2005. Вып. 1 (3). С. 74–84. (0.68 п.л. / 0.34 п.л.);
3. К вопросу моделирования канала распространения радиолокационных сигналов / Е.С. Фитасов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2016. №3. С. 48–56. (0.56 п.л. / 0.2 п.л.);
4. К вопросу повышения эффективности классификации винтовых летательных аппаратов в РЛС дециметрового диапазона / Е.С. Фитасов [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2016. №3. С. 66–71. (0.38 п.л. / 0.1 п.л.);
5. Повышение эффективности автокомпенсации шумовых активных помех в радиолокационных станциях малой дальности / Е.С. Фитасов [и др.] // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2014. № 1(9) С. 45–48. (0.25 п.л. / 0.1 п.л.);
6. Использование спутниковых радионавигационных систем в задачах радиолокации с подсветкой / Е.С. Фитасов // Датчики и системы. 2013. №4. С. 7–14. (0.56 п.л. / 0.14 п.л.);
7. Фитасов Е.С. Система селекции движущихся целей на основе проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов // Датчики и системы. 2017. №3. С. 29–32. (0.25 п.л.);
8. Фитасов Е.С. Система селекции имитирующих помех // Датчики и системы. 2017. №3. С. 24–28. (0.38 п.л.);
9. Оценка когерентности радиолокационных сигналов в антенных решетках на основе анализа распределения энергии сигнала по собственным числам корреля-

- ционной матрицы / Е.С. Фитасов [др.] // Антенны. 2017. №3. С. 31–36. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
10. Фитасов Е.С. Метод повышения эффективности разрешения и оценки параметров радиолокационных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №1. С. 48–52. (0.3 п.л.);
11. Фитасов Е.С. К вопросу повышения эффективности системы защиты от импульсных помех с использованием оценки квантилей статистического распределения процесса // Проектирование и технология электронных средств. 2017. №1. С.16–19. (0.25 п.л.);
12. Фитасов Е.С. Адаптивный алгоритм пеленгации источников шумовых активных помех с использованием оценки квантилей статистического распределения процесса // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 1 (33). С. 18–25. (0.5 п.л.);
13. Сравнительная оценка эффективности методов бланкирования и адаптивного управления для защиты модуляционного радиометра от потока импульсных помех / Е.С. Фитасов [и др.] / Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 2. С. 40–45. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
14. Фитасов Е.С. Оценка радиовидимости низколетящих воздушных объектов с учетом экранирующего воздействия рельефа местности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №2. С. 42–46. (0.3 п.л.);
15. К вопросу оценки влияния интерференции радиоволн в антенных решетках при приеме радиосигналов под малыми углами места в L, S и X частотных диапазонах / Е.С. Фитасов и [др.] // Антенны. 2017. №11. С. 25–30. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
16. Система защиты импульсной радиолокационной системы от дискретных метеорообразований / Е.С. Фитасов [и др.] // Датчики и системы. 2017. №8-9. С. 13–19. (0.4 п.л.);
17. Система синхронизации времени и локального позиционирования на базе беспроводных сетей / Е.С. Фитасов [и др.] // Датчики и системы. 2017. №8–9. С. 20–26. (0.42 п.л. / 0.21 п.л.);
18. Фитасов Е.С., Насонов В.В., Журавлев И.В. Разработка адаптивных алгоритмов компенсации помех для многофункциональных обзорных РЛС в условиях воздействия декоррелирующих факторов и нестационарной помеховой обстановки. Изд-во ЯГПУ им. К.Д.Ушинского. 2014. 145 с. (9 п.л. / 4 п.л.);
19. Фитасов Е.С., Чижов А.А. Вопросы цифровой обработки сигналов в РЛС обнаружения низколетящих целей малой дальности в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки: монография. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ. 2016. 104 с. (6.5 п.л. / 4.3 п.л.);
20. Наземные и вертолетные РЛС разработки ННИИРТ / Е.С. Фитасов [и др.] // История отечественной радиолокации. М.:ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия». 2015. С. 48–78. (1.9 п.л. / 0.4 п.л.);
21. Фитасов Е.С. Малогабаритные РЛС АО «ФНПЦ «ННИИРТ / История отечественной радиоэлектронной техники для сухопутных войск. М.:ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия». 2018. С. 109. (0.06 п.л.);
22. Фитасов, Е.С., Насонов В.В., Журавлев И.В. Повышение эффективности работы автокомпенсатора с непосредственным обращением корреляционной матрицы помех при пространственном перемещении помехопостановщика // Вестник

- Ярославского зенитного ракетного института противовоздушной обороны: сб. научных трудов. Ярославль. 2003. Вып.5. С. 90–101. (0.75 п.л. / 0.37 п.л.);
23. Адаптивный алгоритм компенсации нестационарных помех при изменении угловых соотношений между лучом антенны и помехопостановщиком / Е.С. Фитасов [и др.] // Актуальные проблемы вузов ВВС: межвузовский сборник. 2004. Вып. 17. С. 192-194. (0.2 п.л. / 0.1 п.л.);
24. Фитасов Е.С., Таныгин А.А. Локатор из Нижнего Новгорода: превосходство очевидно // Воздушно-космическая оборона. 2009. №6. С. 50–54. (0.3 п.л./0.2 п.л.);
25. Фитасов Е.С., Насонов В.В., Хмылов Е.С. Адаптивный метод формирования порога обнаружения радиолокационных целей на основе оценки квантилей статистического распределения процесса на выходе системы временной обработки сигналов // Вестник Ярославского государственного университета. Серия Естественные и технические науки. 2013. №3. С. 33–37. (0.3 п.л. / 0.15 п.л.);
26. Влияние пропеллерной модуляции на обнаружение винтовых летательных аппаратов / Е.С. Фитасов [и др.] // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2014. №2. С. 46–54. (0.56 п.л. / 0.28 п.л.);
27. Экспериментальные исследования алгоритма вычисления весовых коэффициентов настройки автокомпенсатора шумовых активных помех для импульсной РЛС малой дальности / Е.С. Фитасов [и др.] // Вестник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (филиал, г. Ярославль): сб. науч. тр.- Ярославль. 2012. Вып. 14. С. 187–192. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
28. Фитасов Е.С., Насонов В.В., Хмылов Е.С. Метод формирования адаптивного порога обнаружения // Вестник филиала Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского (г.Ярославль): сб.науч.тр. Ярославль. 2013. Выпуск 16. С. 35–42. (0.5 п.л. / 0.25 п.л.);
29. Фитасов, Е.С. К вопросу повышения эффективности системы пеленгации постановщиков шумовых активных помех на основе метода порядковых статистик / Е. С. Фитасов, В. В. Насонов, Е. В. Василенко // Сборник филиала академии Можайского. – 2015. – С. 10–12. (0.18 п.л. / 0.1 п.л.);
30. Адаптивные алгоритмы компенсации помех / Д.Н.Ивлев, И.Я.Орлов, А.В.Сорокина, Е.С.Фитасов // Учебно-методическое пособие, Н.Новгород: издательство ННГУ. – 2015. – 75 с. (4.6 п.л. / 2.3 п.л.);
31. 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. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
32. К вопросу оценки радиальной скорости радиолокационного объекта методом наименьших квадратов для случая неизвестной корреляционной матрицы помех / Е.С.Фитасов, В.В.Насонов, В.А.Односецев, Е.В.Леговцова // Вестник ЯВВУ ПВО: научный журнал, Ярославль. 2018. №1. С. 49-55. (0.38п.л./0.19 п.л.);
33. Устройство для обнаружения и классификации летящих и зависших вертолетов: а.с. 2293350 РФ / Фитасов Е.С., Захаров Д.Л.; заявл. 26.04.2005; опубл. 10.02.2007, Бюл. № 4. (0.38 п.л./0.19 п.л.);
34. Передающая система импульсной радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой: а.с. 2295738 РФ / Кокурошников С.М., Марисов П.С., Фитасов Е.С.; заявл. 06.06.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. (0.38 п.л./0.19 п.л.);

35. Блочно-модульная конструкция переносной обзорной радиолокационной станции средней дальности дециметрового диапазона волн: а.с. 87267 РФ / Фитасов Е.С., Марисов П.С., Ананьев В.П.; заявл. 27.04.2009; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. (0.42 п.л. / 0.14 п.л.);
36. Мобильная малогабаритная трехкоординатная РЛС (варианты): а.с. 140847 РФ / Фитасов Е.С., Марисов П.С., Королев А.Г., Смирнов Д.С., Саберов А.Г.; заявл. 21.08.2013; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. (0.32 п.л. / 0.16 п.л.);
37. Устройство распознавания винтовых летательных аппаратов: а.с. 157396 РФ / Фитасов Е.С., Козлов С.А.; заявл. 19.08.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34. (0.32 п.л. / 0.2 п.л.);
38. Блочно-модульная конструкция переносной обзорной радиолокационной станции средней дальности дециметрового диапазона волн: а.с. 127200 РФ / Марисов П.С., Васяков С.А., Фитасов Е.С.; заявл. 10.09.2012; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 27. (0.32 п.л. / 0.11 п.л.);
39. Способ определения модуля скорости баллистической цели в наземной радиолокационной станции: а.с. 2540323 РФ / Фитасов Е.С., Белоногов П.З., Бомштейн А.Д.; заявл. 21.01.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 27. (0.39 п.л. / 0.13 п.л.);
40. Устройство радиолокационного определения путевой скорости неманеврирующей воздушной цели: а.с. 152617 РФ / Белоногов П.З., Белоус Р.А., Фитасов Е.С.; заявл. 03.10.2014; опубл. 18.05.2015, Бюл. № 8. (0.58 п.л. / 0.18 п.л.);
41. Радиолокационный измеритель путевой скорости неманеврирующей аэродинамической цели по выборке квадратов дальности: а.с. 158491 РФ / Белоногов П.З., Белоус Р.А., Фитасов Е.С.; заявл. 07.07.2015; опубл. 10.01.2016, Бюл. № 1. (0.46 п.л. / 0.14 п.л.);
42. Способ селекции движущихся целей: а.с. 2593276 РФ / Фитасов Е.С., Легочова Е.В.; заявл. 04.08.2015; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. (0.38 п.л./0.27 п.л.);
43. Способ и устройство радиолокационного обнаружения маневра баллистического объекта по выборкам квадрата дальности: а.с. 2615784 РФ / Белоногов П.З., Бомштейн А.Д., Фитасов Е.С., Прядко А.Н., Козлов С.А., Хмылов Е.С.; заявл. 23.09.2016; опубл. 11.04.2017, Бюл. №11. (0.38 п.л. / 0.1 п.л.);
44. Мобильная трехкоординатная РЛС: а.с. 4618786 РФ / Фитасов Е.С., Козлов С.А., Телицин А.В., Вертьянов О.Ю., Ананьев В.П.; опубл. 11.04.2017, Бюл. №11. (0.38 п.л. / 0.19 п.л.);
45. Фитасов Е.С., Михеев, П.В. Метод формирования адаптивного порога обнаружения // Труды междунар. выставки–конф. «Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления». Н. Новгород. 2002. С. 125. (0.2 п.л. / 0.1 п.л.);
46. Фитасов Е.С., Михеев, П.В. Метод синтеза эффективной доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов // Труды 12–й междунар. научно–тех. конф. «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж. 2006. Т.3. С. 1675–1679. (0.3 п.л. / 0.15 п.л.);
47. Обнаружение спутниковых радионавигационных сигналов, отраженных от наземных объектов / Е.С. Фитасов [и др.] // Труды X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии передачи информации», Владимир, 26–28 июня. 2013. том 1, С. 85–87. (0.25 п.л. / 0.12 п.л.);
48. Фитасов, Е.С., Козлов С.А. Исследование возможности использования методов сверхразрешения для классификации винтовых летательных аппаратов // В сб.:

- Докл. XVII -й научн-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». 12-14 апреля. 2011 г. Воронеж: 2011. Т.3. С. 2041–2049. (0.56 п.л. / 0.3 п.л.);
49. Фитасов Е.С., Горячкина О.Е. Оценка эффективности проекционного метода доплеровской фильтрации радиолокационных сигналов в РЛС дециметрового диапазона // В сб.: Докл. XVII -й научн-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». 12-14 апреля. 2011 г. Воронеж: 2011. Т.3. С. 2079–2084. (0.38 п.л. / 0.27 п.л.);
50. К вопросу селекции имитирующих помех на основе оценки степени когерентности радиосигналов / Е.С. Фитасов [и др.] // Материалы 12-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии передачи информации» / Владим. гос. университет, в 2-х томах; ред.: А.Г.Самойлов. Владимир, ВлГУ. 2017. том I. С. 98–101. (0.38 п.л. / 0.1 п.л.); (0.25 п.л. / 0.12 п.л.);
51. Фитасов Е.С., Сатаев В.В., Макарова Ю.М. Метод защиты от импульсных помех с адаптивным порогом обнаружения на основе порядковых статистик // Материалы 12-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии передачи информации» / Владим. гос. университет, в 2-х томах; ред.: А.Г.Самойлов. Владимир, ВлГУ. 2017. том I. С. 168–170. (0.18 п.л./0.12 п.л.);
52. Метод локального позиционирования с использованием технологии WiFi / Е.С. Фитасов [и др.] // Материалы 12-ой международной научно-технической конференции «Перспективные технологии передачи информации» / Владим. гос. университет, в 2-х томах; редкол.: А.Г.Самойлов [и др]. Владимир, ВлГУ. 2017. том II. С.132-134. (0.18 п.л. / 0.1 п.л.);
53. Фитасов, Е.С., Насонов В.В., Хмылов Е.С. Метод формирования адаптивного порога обнаружения // Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции «Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд в условиях информатизации общества», Ярославль. 2014. С. 101–104. (0.25 п.л. / 0.15 п.л.);
54. Система формирования адаптивного порога обнаружения на основе метода порядковых статистик / Е.С. Фитасов [и др.] // XIV Всероссийская научно-практическая конференция 8 ноября 2014 года «Проблемы развития и применения средств противовоздушной обороны на современном этапе. Средства противовоздушной обороны России и других стран мира, сравнительный анализ». Сборник докладов, Ярославль. 2013. С. 179–183. (0.3 п.л. / 0.15 п.л.);
55. Синтез алгоритма обнаружения винтовых летательных аппаратов в дециметровых РЛС с применение методов сверхразрешения / Е.С. Фитасов [и др.] // XV Всероссийская научно-практическая конференция 2-3 октября 2014 года «Проблемы развития и применения средств противовоздушной обороны на современном этапе. Средства противовоздушной обороны России и других стран мира, сравнительный анализ» Секции 6-9 Сборник докладов, Ярославль. 2014. С. 152–162. (0.68 п.л. / 0.34 п.л.);
56. Фитасов Е.С., Козлов С.А., Насонов В.В. К вопросу повышения качества информационного обеспечения малогабаритных РЛС обнаружения низколетящих целей // XV Всероссийская научно-практическая конференция 2-3 октября 2014 года «Проблемы развития и применения средств противовоздушной обороны на современном этапе. Средства противовоздушной обороны России и других стран мира, сравнительный анализ» Секции 6-9 Сборник докладов, Ярославль. 2014. С. 145–152. (0.48 п.л. / 0.24 п.л.).