

На правах рукописи



Душко Ирина Владимировна

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
СИГНАЛОВ МАЛОГАБАРИТНОЙ РЛС
В УСЛОВИЯХ МНОЖЕСТВЕННЫХ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ
НА ФОНЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2010

Работа выполнена на кафедре радиотехники радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Орлов И.Я.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Флакман А.Г.
доктор технических наук
профессор Рындык А.Г.

Ведущая организация - Институт прикладной физики РАН

Защита состоится «9» июня 2010 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДС 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из важнейших задач радиолокационной станции (РЛС) является измерение угловых координат источника излучения полезного сигнала, которое основано на определении направления прихода электромагнитных волн, излученных или отраженных целью. Однако характерное для радиолокации многолучевое распространение радиоволн и невозможность строгого учета влияния конкретного рельефа на зоны обнаружения делают поставленную задачу особо актуальной. Мощные отражённые земной поверхностью лучи приводят к искажениям оценок угла прихода полезного сигнала, а в ряде случаев и к обнаружению ложной цели при сканировании по углу места. Сильнее всего этот нежелательный эффект проявляется при обнаружении низколетящих целей, т.е. целей с малыми углами места.

Для обеспечения высокой мобильности (возможности ручной переноски РЛС расчетом из трех-четырех человек) к современным станциям предъявляют жесткие ограничения по массе, габаритным размерам и энергопотреблению, которые исключают применение мощных передающих устройств и ограничивают размеры полотна антенной решетки. Наложение на малогабаритные РЛС данных ограничений, а также исключительная сложность электромагнитной обстановки, приводят к новой, требующей детального исследования задаче синтеза на базе «малоэлементной» антенны алгоритмов цифровой обработки, обеспечивающих эффективные характеристики подавления различного рода помех и высокое качество обработки радиолокационных сигналов.

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка алгоритмов пространственной обработки радиолокационных сигналов для повышения эффективности работы малогабаритной РЛС в условиях множественных переотражений радиолокационных сигналов на фоне активных шумовых помех (АШП).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Синтез на базе «малоэлементной» антенны системы обработки радиолокационных сигналов, обеспечивающей эффективное подавление АШП.
2. Исследование эффективности работы автокомпенсатора в зависимости от числа приемных элементов, необходимых для формирования компенсационных каналов на базе «малоэлементной» антенной решетки.
3. Разработка алгоритма имитационного моделирования и проведение компьютерного моделирования канала распространения радиосигнала с целью определения степени и характера влияния земной поверхности на принимаемый РЛС сигнал.
4. Исследование путем компьютерного моделирования эффективности использования методов матричной режекции, максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания для оценки угловых координат цели в условиях множественных переотражений от земной поверхности.

Методы исследования

Проведенные в работе исследования базируются на методах математической статистики, статистической радиофизики, теории матриц, теории вероятностей, теоретической радиолокации, а также на методах аналитической геометрии, математического и имитационного моделирования с использованием разработанных автором программ и натурных экспериментах.

Научная новизна работы

1. Обоснована возможность и разработана методика построения системы автокомпенсации АШП на базе «малоэлементной» антенной решетки малогабаритной РЛС.
2. Приведены сравнительные характеристики подавления автокомпенсатора в зависимости от числа приемников, используемых для формирования компенсационных каналов на основе «малоэлементной» антенны малогабаритной РЛС.
3. Установлено, что для эффективного подавления АШП при синтезе автокомпенсатора на основе антенной решетки малогабаритной РЛС необходимо ввести дополнительное ограничение на число обусловленности корреляционной матрицы помехи в компенсационных каналах, которое должно быть около 10 – 20.
4. Разработаны модель и алгоритм имитационного моделирования канала распространения сигнала в системе активной радиолокации, учитывающие динамику движения цели и многолучевой характер распространения сигнала.
5. Обоснована возможность использования методов максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания для оценки угловых координат при малых углах места цели в малогабаритной РЛС при наличии множественных переотражений от земной поверхности.
6. Предложен метод обнаружения и классификации вертолетов по сигналу, отраженному несущими винтами. В отличие от существующих, данный алгоритм дает принципиальную возможность для РЛС кругового обзора с высоким темпом вращения антенны (15-30 оборотов в минуту) выделять сигналы, отраженные от лопастей винта вертолета (в том числе и зависшего). Проведен анализ эффективности работы малогабаритной РЛС при разных темпах обзора, для различных моделей винтовых летательных аппаратов.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Введенное дополнительное ограничение на число обусловленности корреляционной матрицы помехи при синтезе автокомпенсатора АШП на основе антенной решетки малогабаритной РЛС, позволяющее получить эффективное подавление помехи и обеспечить условия приема полезного сигнала.
2. Методика построения системы автокомпенсации в малогабаритной РЛС, позволяющая определить количество приемных устройств, необходимых для формирования компенсационных каналов на базе «малоэлементной» антенной решетки.
3. Синтезированный алгоритм моделирования канала распространения радиолокационного сигнала в системе активной радиолокации, позволяющий

учесть динамику движения цели и многолучевой характер распространения сигнала.

4. Предложенный алгоритм обнаружения и классификации вертолетов по радиолокационному сигналу, отраженному несущими винтами, позволяющий малогабаритной РЛС малой дальности обнаруживать и распознавать вертолеты (в том числе зависшие).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Обоснована возможность синтеза системы автокомпенсации АШП на основе «малоэлементной» антенной решетки малогабаритной РЛС.
2. Проведен анализ влияния числа обусловленности корреляционной матрицы помехи в компенсационных каналах автокомпенсатора на эффективность подавления АШП и условия приема полезного сигнала в малогабаритной РЛС.
3. Обоснована возможность применения методов максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания при наличии множественных переотражений от земной поверхности для оценки угловых координат при малых углах места цели в малогабаритной РЛС.
4. Проведен анализ эффективности работы малогабаритной РЛС при разных темпах обзора пространства по распознаванию различных моделей винтовых летательных аппаратов.

Практическая значимость работы состоит в разработанной системе моделирования канала распространения сигнала в системе активной радиолокации, позволяющей уменьшить материальные затраты на проведение испытаний РЛС. Предложенный принцип построения системы автокомпенсации, а также алгоритм обнаружения, распознавания и классификации вертолетов могут быть использованы в практической радиолокации при разработке малогабаритных РЛС малой дальности, функционирующих в условиях множественных переотражений от земной поверхности и воздействия активных шумовых и пассивных помех.

Внедрение полученных результатов

Основные результаты диссертации использовались при проектировании и создании малогабаритной РЛС 1Л122, ее модификации (1Л122-1) и модернизаций (1Л122М, 1Л122М-1), разрабатываемых в Нижегородском НИИ радиотехники.

Вклад автора

1. Обосновал возможность построения системы компенсации помех при наличии общих элементов в антеннах основного и вспомогательных каналов малогабаритной РЛС малой дальности.
2. Проанализировал работу автокомпенсатора в зависимости от числа приемников, используемых для формирования компенсационных каналов на основе «малоэлементной» антенной решетки малогабаритной РЛС.
3. Установил необходимость дополнить новым условием традиционные требования, предъявляемые к построению систем автокомпенсации на основе «малоэлементных» антенных решеток.

4. Исследовал влияние случайных ошибок адаптивного процессора управления на эффективность подавления шумовых помех в трехканальном автокомпенсаторе малогабаритной РЛС при прямом формировании весовых коэффициентов.
5. Разработал систему моделирования канала распространения радиолокационных сигналов в системе активной радиолокации и провёл моделирование каналов «РЛС – цель – РЛС» и «удаленный объект – РЛС» для некоторых практически важных ситуаций.
6. Исследовал возможность использования методов матричной режекции, максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания в условиях многолучевого характера распространения сигнала для оценки угловых координат при малых углах места цели в малогабаритной РЛС.
7. Разработал алгоритм и провел компьютерное моделирование системы по распознаванию и классификации вертолетов. Рассчитал вероятность определения скорости вращения несущего винта вертолета и провел анализ эффективности работы малогабаритной РЛС при разных темпах обзора пространства по распознаванию различных моделей винтовых летательных аппаратов.

Публикации и апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы представлялись на 10-й, 12-й и 13-й научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2006, 2008, 2009), XII-й и XIV-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2007, 2009), XIV международной научно-технической конференции «Радиолокация. Навигация. Связь» (Воронеж, 2008).

По результатам работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых центральных журналах из списка ВАК, 1 статья в трудах международной научно-технической конференции.

Работа выполнена в рамках Ведущей научной школы РФ «Физика нелинейных и случайных волн в приложении к проблемам акустики и радиофизики» (НШ 3700.2010.2), в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (тема «Разработка новых способов повышения помехоустойчивости информационно-измерительных систем против мощных помех» – госконтракт № П1239).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 148 страниц. Список использованных источников содержит 110 наименований и приведен на 12 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагаются состояние и актуальность предмета исследования, краткий обзор известных результатов по теме диссертации, цели и структура работы.

В первой главе рассмотрены основные задачи по реализации системы автокомпенсации, обеспечивающей эффективные характеристики подавления АШП и высокое качество обработки радиолокационных сигналов в ма-

логобаритной РЛС. Предложен алгоритм трехканального автокомпенсатора АШП на основе метода непосредственного обращения корреляционной матрицы помех. Рассматривается несколько схем формирования трех компенсационных каналов автокомпенсатора АШП на базе восьмиэлементной антенны с использованием трех, четырех и пяти приемных модулей.

На рис. 1 приведены диаграммы направленности (ДН) основного и компенсационных каналов (кривые 0,1,2 и 3, соответственно), сформированных по схеме (рис. 2) с пятью радиоприемными устройствами (РПУ).

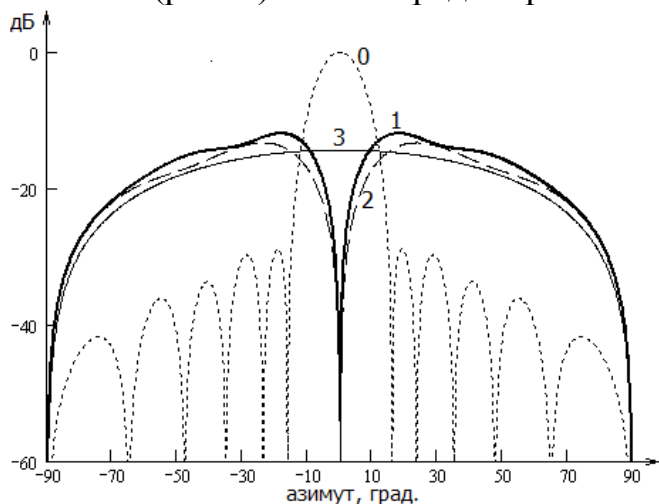


Рис. 1

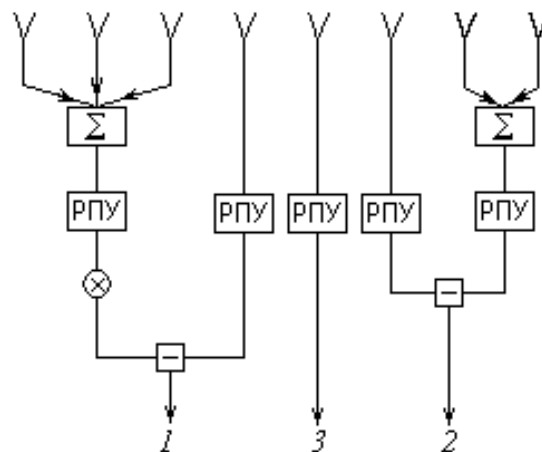


Рис. 2

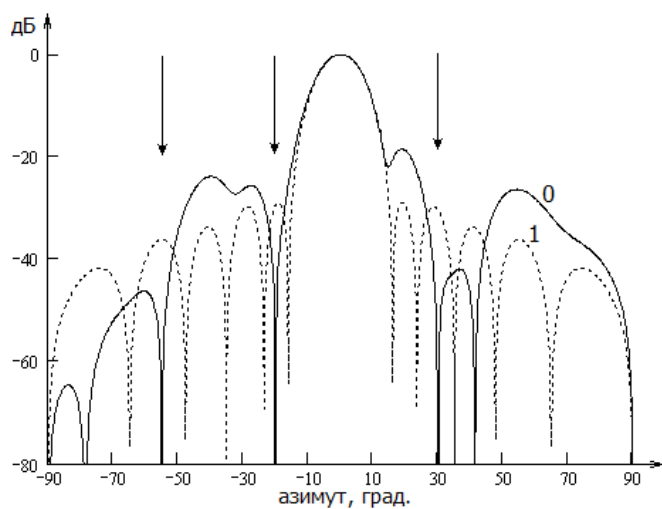


Рис. 3

При воздействии трех АШП в результирующей ДН (рис. 3, кривая 0) формируются глубокие провалы, ориентированные на источники помех, что свидетельствует о когерентной компенсации мешающих сигналов в автокомпенсаторе. При этом форма главного лепестка адаптивной ДН остается практически неизменной относительно максимума ДН (рис. 3, кривая 1) основного приемного канала. Таким образом, использо-

вание пяти приемников позволяет устранить влияние трех пространственно разнесенных АШП, действующих по боковым лепесткам основного приемного канала, а также обеспечить условия приема полезного сигнала.

На основе проведенных исследований, установлено, что для эффективного подавления АШП при синтезе автокомпенсатора АШП на основе антенной решетки малогабаритной РЛС необходимо ввести дополнительное ограничение на число обусловленности корреляционной матрицы помехи в компенсационных каналах, которое должно быть около 10 – 20.

Проводится анализ эффективности работы во времени автокомпенсатора с прямым методом формирования весовых коэффициентов. Показано, что мощность остаточного шума на выходе автокомпенсатора с пятью приемни-

ками не превышает минимальную более чем на 3 дБ уже после 10 выборок, что согласуется с теорией и говорит о довольно высокой скорости сходимости алгоритма непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы помехи.

Исследуется влияние случайных ошибок оценки коэффициентов уравнения, определяющего весовой вектор, на эффективность подавления шумовых помех компенсатором при прямом вычислении весового вектора.

Установлено, что общая эффективность системы подавления с прямым формированием вектора весовых коэффициентов определяется в основном точностью оценки элементов корреляционной матрицы помехи. На примере трехканального автокомпенсатора показано, что для эффективного подавления помехи относительная дисперсия ошибок процессора управления не должна превышать значений $10^{-6} - 10^{-7}$ в зависимости от сложившейся помеховой ситуации.

Во второй главе приводится описание трехкомпонентной модели беспроводного канала «передача-прием» и многокомпонентной модели канала распространения сигналов активной радиолокации. С использованием данных моделей разработана методика и алгоритмы имитационного моделирования канала связи с удаленным объектом.

Наличие земной поверхности приводит к многолучевому характеру распространения радиоволн, что существенно влияет на качество обнаружения и измерения параметров полезного сигнала в задачах радиолокации. Однако оценить состояние канала аналитическими методами с учётом динамики движения летательного аппарата и разнообразия вариантов позиционирования приемной и передающей систем практически невозможно. В связи с этим при проектировании РЛС существует необходимость в моделировании канала распространения радиосигнала с целью определения степени и характера влияния земной поверхности на принимаемый сигнал, а также требований к ДН приемной антенны РЛС.

Для детального анализа структуры сигналов, поступающих на вход РПУ РЛС, в работе первоначально рассматривается канал «передача-прием», используя трехкомпонентную модель канала связи, учитывающую основные механизмы прохождения сигнала по трассе «удаленный объект – РЛС». В соответствии с данной моделью при приеме информации от аппаратуры удаленного объекта по каналу радиосвязи процесс на входе РПУ РЛС можно представить состоящим из трех компонент:

- прямой сигнал, прошедший по кратчайшему расстоянию между передающим и приемным устройствами,
- сигнал, зеркально отраженный от подстилающей поверхности,
- рассеянная компонента, образующаяся в результате переотражения неровностями поверхности.

Рассеянная составляющая сигнала образуется суммированием в точке приема сигнальных импульсов, переотраженных от различных участков неровной подстилающей поверхности, которые создают на входе РПУ пассив-

ную помеху, представляющую собой узкополосный шум с гауссовым распределением мгновенных значений.

В результате обобщения трехкомпонентной модели канала связи «удаленный объект – РЛС» на случай активной радиолокации получим многокомпонентную модель, согласно которой сигнал в приемном тракте РЛС представляет собой сумму нескольких компонент, имеющих следующие пути распространения:

- РЛС – цель – РЛС по линии прямой видимости
- РЛС – ТЗО (точка зеркального отражения) – цель – РЛС
- РЛС – цель – ТЗО – РЛС
- РЛС – ТЗО – цель – ТЗО – РЛС
- РЛС – цель – рассеяние подстилающей поверхностью – РЛС
- РЛС – рассеяние подстилающей поверхностью – РЛС.

С помощью разработанного программного обеспечения было проведено моделирование каналов распространения радиолокационных сигналов при различных условиях (гладкая равнинная местность, водная подстилающая поверхность). По данным результатам проведён анализ сигнально-помеховой обстановки и надёжности передачи информации для некоторых практически важных случаев.

Моделирование показало, что в условиях земной подстилающей поверхности квазизеркально отражённым лучом можно пренебречь при углах скольжения луча, превышающих несколько градусов, и каналы связи «удаленный объект – РЛС» и «РЛС – цель – РЛС» можно считать однолучевыми. В случае же водной подстилающей поверхности мощность квазизеркально отражённого луча сравнима с мощностью прямого луча в широком диапазоне значений углов места удаленного объекта/цели (рис. 4), вследствие чего они интерферируют, приводя к замираниям принимаемого сигнала (рис. 5), частота которых растет с увеличением высоты поднятия антенны РЛС.

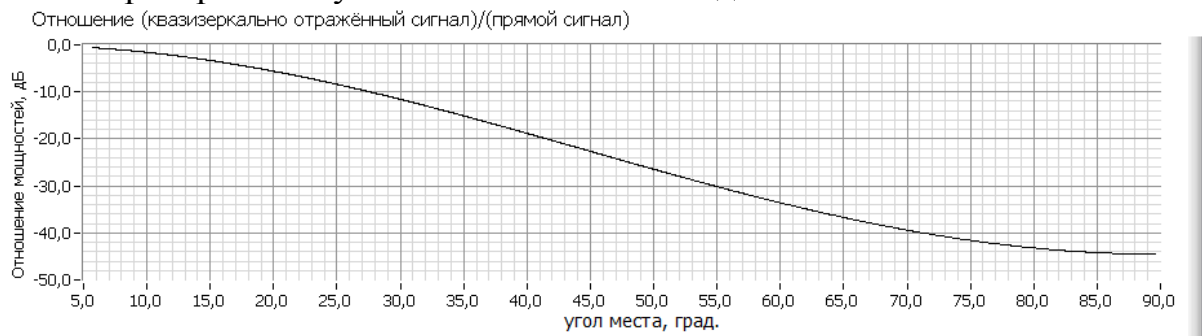


Рис. 4

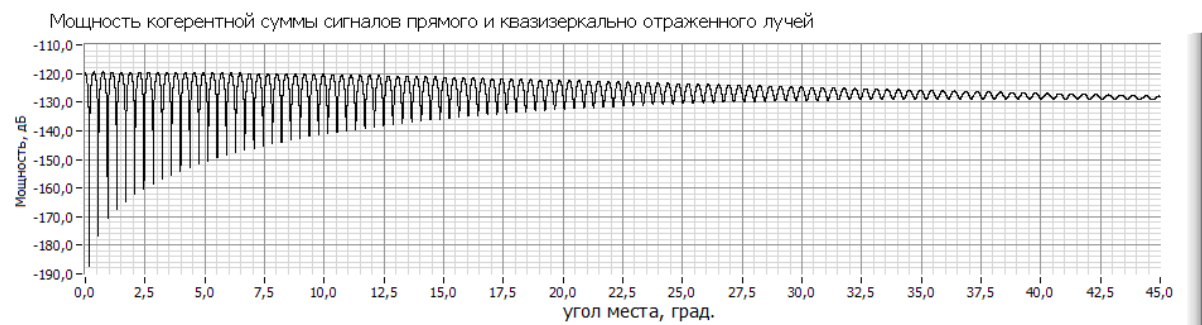


Рис. 5

Использование узкой ДН на прием и передачу с большим коэффициентов усиления позволяет уменьшить замирания принимаемого сигнала, снижая тем самым вероятность пропуска цели. Также существенно снижается уровень мощности квазизеркально отраженного от водной поверхности сигнала (рис. 6) и доля шумовой компоненты в принимаемом сигнале, приводя к увеличению отношения сигнал/шум.

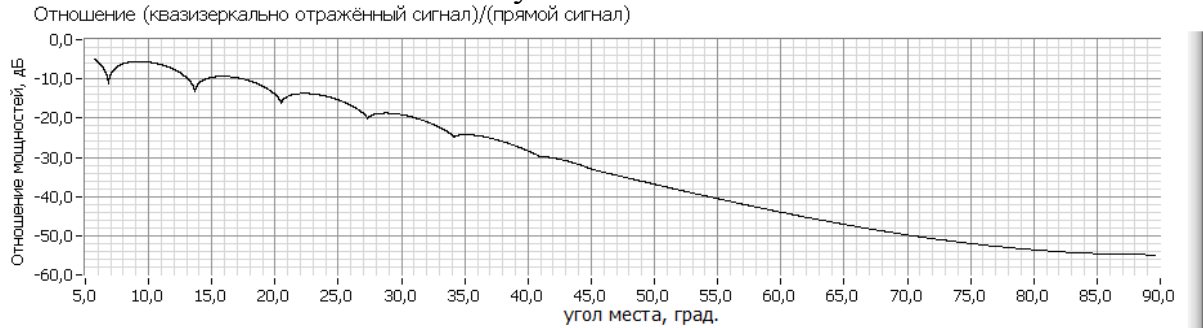


Рис. 6

Проведённое имитационное моделирование подтвердило влияние и необходимость учёта всех компонент предложенной модели канала распространения сигнала.

В третьей главе исследуется проблема обнаружения и измерения параметров цели в условиях переотражений различного происхождения. Рассматривается три подхода к решению задачи определения угла места цели при наличии отражений от подстилающей поверхности, а именно, метод матричной режекции, метод максимального правдоподобия, а также прямого и обратного линейного предсказания. Путем компьютерного моделирования исследуется эффективность данных методов в системе активной радиолокации при множественных переотражениях от земной поверхности.

В соответствии с теорией обнаружения и измерения параметров сигналов на фоне помех оптимальный весовой вектор пространственной обработки определяется выражением

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

где \mathbf{S} – вектор полезного сигнала, \mathbf{R} – корреляционная матрица помехи.

Если предположить, что переотражённый сигнал после его временной обработки значительно превосходит по мощности собственный шум, то обратная матрица в (1) хорошо аппроксимируется матрицей-проектором на ортогональное переотражённым сигналам подпространство, то есть

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

где \mathbf{E} – единичная матрица, $\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{S}}(\tilde{\mathbf{S}}^H\tilde{\mathbf{S}})^{-1}\tilde{\mathbf{S}}^H$ – матрица-проектор на подпространство переотражённых сигналов, $\tilde{\mathbf{S}} = [\mathbf{S}(\varepsilon_1), \mathbf{S}(\varepsilon_2), \dots, \mathbf{S}(\varepsilon_m)]$ – матрица переотражённых сигналов с направлениями прихода $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m$, $(\bullet)^H$ обозначает эрмитово сопряжение.

На рис. 7 приведены ДН четырех пространственных каналов, соответствующие ожидаемым углам прихода полезного сигнала $\varepsilon_0 = 1, 2, 3, 4$ градуса (кривые 0, 1, 2 и 3, соответственно) при наличии режекции направлений $-1, -3, -5$ градусов.

Слабое различие между ДН каналов практически исключает возможность эффективного измерения малых углов места. Вторым негативным эффектом состоит в том, что при малых углах места наблюдается существенное

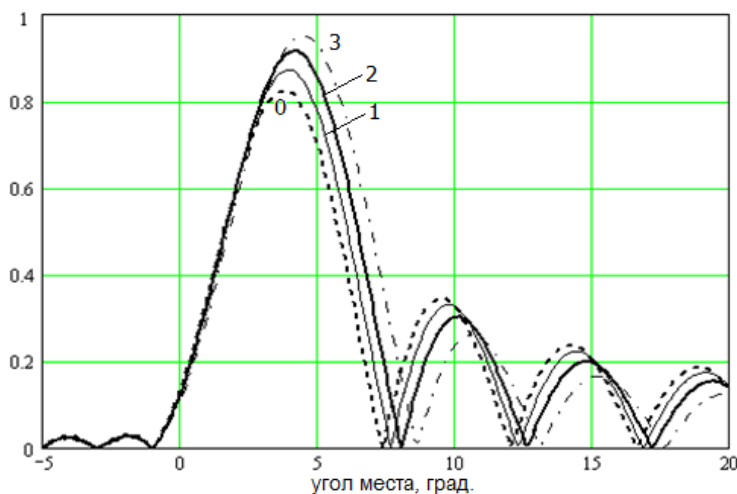


Рис. 7

уменьшение коэффициента передачи пространственных фильтров. Это свидетельствует о невысокой эффективности данного метода в условиях многолучевого распространения волн.

Приведенный во введении аналитический обзор по проблеме повышения точности измерения малых углов места цели в системе активной радиолокации в условиях множественных переотражений от земной поверхности показал, что среди методов спектрального сверхразрешения наиболее эффективным алгоритмом является метод прямого и обратного линейного предсказания.

Характерный вид пеленгационной характеристики в зависимости от угла места (град.), получаемой методом прямого и обратного линейного предсказания, приведен на рис. 8 для случая диффузного переотражения и на рис. 9 для квазизеркального отражения от земной поверхности при состоявшемся разрешении прямого и зеркально отраженного лучей.

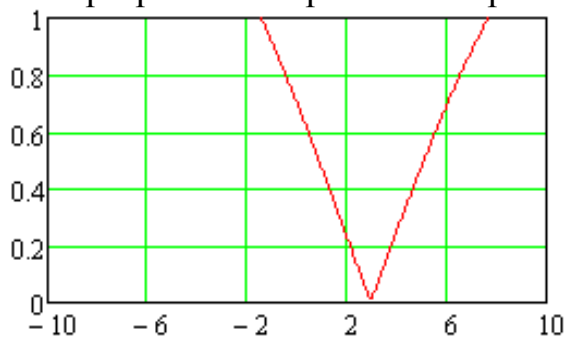


Рис. 8

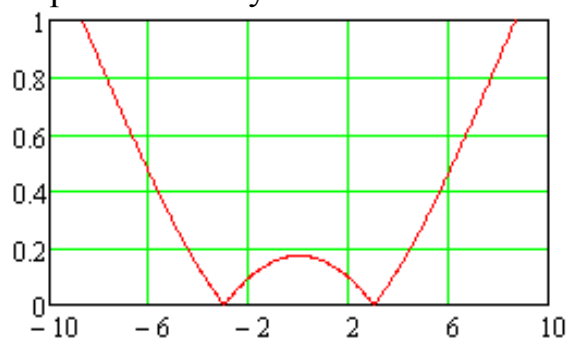


Рис. 9

Алгоритм измерения угла места заключается в поиске координаты абсолютного минимума пеленгационной характеристики в области положительных углов места, которая будет выступать в качестве оценки угла места цели.

Метод максимального правдоподобия заключается в параметрической максимизации решающей статистики по возможным угловым координатам прямого и квазизеркально отраженного лучей.

В работе приведены зависимости среднеквадратической ошибки измерения от углового положения цели для методов максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания. В качестве параметра использовалось отношение амплитуды прямого сигнала к стандартному отклонению шума (отношение сигнал/шум) на входе пространственной обработки.

Моделирование показало, что как при диффузном, так и зеркальном переотражении методы максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания обеспечивают приемлемую точность измерения малых углов места обнаруживаемых объектов, т.к. величина среднеквадратической погрешности, обеспечиваемая данными методами, значительно меньше ширины ДН. Приведены результаты натурных испытаний с низколетящей целью.

В работе приведен пример использования особенностей переотражения излучения для распознавания и классификации летящих и зависших вертолетов по сигналу, отраженному несущими винтами.

С целью сокращения времени распознавания класса цели целесообразно использовать сигнальные признаки. Для решения задачи распознавания вертолетов, в том числе зависших, предлагается использовать сигнальный признак – явление вторичной (пропеллерной) модуляции радиолокационного сигнала при отражении от лопастей несущего винта. Показано, что существующие методы неприменимы для решения задач распознавания вертолетов в РЛС малой дальности, при условии комплексной реализации алгоритмов обработки и режимов работы РЛС. При работе РЛС с высоким темпом обзора построение доплеровского спектра сигнала, отраженного от винтов вертолета, из-за короткой выборки сигнала не представляется возможным. Поэтому, предложен алгоритм обнаружения и классификации вертолетов, основанный на процедуре выделения и обработки зондирующего радиосигнала, отраженного лопастями несущего винта.

Алгоритм обнаружения сигнала, отраженного несущими винтами вертолета, на фоне сигнала, отраженного от корпуса, в данной работе предлагается реализовать по структурной схеме, приведенной на рис. 10.



Рис. 10

Основное преимущество предложенного метода заключается в том, что вся обработка сигнала происходит во временной области, на основе схемы череспериодного вычитания, что дает принципиальную возможность для РЛС кругового обзора с высоким темпом обзора (15-30 об/мин) выделять сигналы, отраженные от лопастей винта.

Предложенный метод дает возможность распознавать не только летящие и планирующие вертолеты, но также и зависшие вертолеты. Проведен анализ эффективности работы малогабаритной РЛС при разных темпах обзора по распознаванию различных моделей винтовых летательных аппаратов.

В заключении приводятся основные достигнутые при выполнении работы результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен синтез системы автокомпенсации АШП при наличии общих элементов в антеннах основного и вспомогательных каналов малогабаритной РЛС малой дальности. Проведенный анализ работы трехканального автокомпенсатора в зависимости от числа приемников, применяемых при формировании компенсационных каналов, показал, что использование пяти приемников позволяет устранить влияние трех пространственно разнесенных АШП, действующих по боковым лепесткам основного приемного канала и обеспечить условия приема полезного сигнала. Обосновано применение метода непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы помехи для формирования весовых коэффициентов при адаптивной пространственной обработке сигналов в автокомпенсаторе в случае произвольной помеховой обстановки и оценено необходимое количество компенсационных каналов для подавления трех шумовых помех. Показано, что для эффективного подавления АШП при синтезе автокомпенсатора на основе антенной решетки малогабаритной РЛС необходимо ввести дополнительное ограничение на число обусловленности корреляционной матрицы помехи в компенсационных каналах, которое должно быть около 10 – 20. Установлено, что общая эффективность системы подавления с прямым формированием вектора весовых коэффициентов определяется в основном точностью оценки элементов корреляционной матрицы помехи. На примере трехканального автокомпенсатора показано, что для эффективного подавления помехи относительная дисперсия ошибок процессора управления не должна превышать значений $10^{-6} - 10^{-7}$ в зависимости от сложившейся помеховой ситуации.
2. Разработаны универсальная модель и алгоритм имитационного моделирования канала распространения сигнала в системе активной радиолокации, учитывающие динамику движения цели, свойства отражающей поверхности и многолучевой характер распространения сигнала. Проведенное моделирование показало, что в условиях земной подстилающей поверхности уже при углах скольжения луча, превышающих несколько градусов каналы распространения радиолокационных сигналов по трассам «удаленный объект – РЛС» и «РЛС – цель – РЛС» можно считать однолучевыми. В условиях водной поверхности прием радиоизлучения затруднен вследствие очень высокого уровня рассеянного сигналов и большой мощности сигнала квазизеркально отраженного луча. Это приводит к низкому отношению сигнал/шум, а также к глубоким и быстрым замираниям принимаемого сигнала, сильнее всего проявляющимся при малых углах места.
3. Исследована путем компьютерного моделирования эффективность использования методов матричной режекции и максимального правдоподобия, а также метода прямого и обратного линейного предсказания в малогабаритной РЛС для оценки угловых координат при малых углах места цели в условиях множественных переотражений от земной поверхности. Установлено, что использование метода матричной режекции при малых углах приводит к подавлению не только помехи, но и полезного сигнала, что свидетельствует о невысокой эффективности данного метода в условиях многолучевого рас-

пространения волн. Приведены результаты моделирования, показывающие, что методы максимального правдоподобия и прямого и обратного линейного предсказания позволяют получить существенно лучшие результаты по сравнению с известными методами согласованной фильтрации и режекции переотражённого луча. Установлено, что при зеркальном переотражении оценивание угла места цели по методу максимального правдоподобия оказалось точнее метода прямого и обратного линейного предсказания. В случае диффузного рассеяния волн земной поверхностью лучшие результаты показал метод прямого и обратного линейного предсказания, что особенно проявляется при низком отношении сигнал/шум.

4. Предложен метод обнаружения и классификации вертолетов за счет выделения и обработки зондирующего радиосигнала, отраженного лопастями несущего винта. Показано, что из-за короткой выборки сигнала при работе РЛС с высоким темпом обзора (15-30 об/мин) построение доплеровского спектра сигнала, отраженного от винтов вертолета, не представляется возможным. Основное преимущество предложенного алгоритма заключается в том, что вся обработка сигнала происходит во временной области, что дает принципиальную возможность для РЛС с высоким темпом обзора (15-30 об/мин) выделять сигналы, отраженные лопастями винта. Предложенный метод дает возможность распознавать не только летящие и планирующие вертолеты, но также и зависшие вертолеты. Проведен анализ эффективности работы малогабаритной РЛС при разных темпах обзора, для различных моделей винтовых летательных аппаратов, который показывает возможность с достаточной степенью точности определить модель летательного аппарата.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Душко, И.В. Метод распознавания и классификации летящих и зависших вертолетов / И.В. Душко, Д.Л. Захаров, Е.С. Фитасов // Вестник Нижегородского государственного университета. Серия: Радиофизика.– 2005.– Вып.1(3).– С. 78–84.
2. Душко, И.В. Метод межпериодной обработки радиолокационных сигналов / И.В. Душко, П.В. Михеев, Е.С. Фитасов, Д.Л. Захаров // Труды (десятой) научн. конф. по радиофизике, 7 мая 2006 г.– Н.Новгород, 2006.
3. Душко, И.В. Проблема синтеза автокомпенсатора активных шумовых помех на базе антенной решетки радиолокационной системы / И.В. Душко // Труды 12-ой Нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины.– Н. Новгород, 2007.– С. 46–47.
4. Душко, И.В. Проблема формирования антенных систем основного и компенсационных пространственных каналов в импульсном радиолокаторе / И.В. Душко, П.В. Михеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.– 2008.– № 1.– С. 35–38.
5. Михеев, П.В. К вопросу о выборе антенных систем компенсационных каналов в радиолокаторе / П.В. Михеев, И.В. Душко // Сборник докладов XIV международной научно-технической конференции «Радиолокация. Навигация. Связь». – Воронеж, 2008.– Т.3.– С. 1869–1873.

6. Dushko, I.V. Forming of compensating channel antenna systems on the basis of an antenna array in the radar / I.V. Dushko // Труды (двенадцатой) научной конференции по радиофизике, посвященной 90-й годовщине со дня рождения М.М. Кобрин, 7 мая 2008 г.– Н.Новгород, 2009.
7. Михеев, П.В. Синтез автокомпенсатора активных помех при наличии общих элементов в антеннах основного и вспомогательных каналов / П.В. Михеев, И.В. Душко // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ.– 2008.– Вып.3.– С. 96–102.
8. Душко, И.В. Моделирование канала распространения радиосигнала РЛС ближнего действия / И.В. Душко, Д.Н. Ивлев, Д.Н. Кириллов // Труды (тринадцатой) научн. конф. по радиофизике, 7 мая 2009 г.– Н.Новгород, 2009.
9. Ивлев, Д.Н. Моделирование диффузно рассеянного подстилающей поверхностью радиолокационного сигнала / Д.Н. Ивлев, И.В. Душко // Труды 14-ой Нижегородской сессии молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины.– Н.Новгород, 2009.
10. Душко, И.В. Компонентное распределение мощности отражённого от цели радиолокационного сигнала на входе антенной системы РЛС / И.В. Душко, Д.Н. Ивлев, В.А. Односецев, И.Я. Орлов // Антенны.– 2009.– № 12.– С. 31–39.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СИНТЕЗ АВТОКОМПЕНСАТОРА АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ НА БАЗЕ «МАЛОЭЛЕМЕНТНОЙ» АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ.....	28
1.1 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИСТЕМЕ КОМПЕНСАЦИИ ШУМОВЫХ ПОМЕХ И МОДЕЛЬ СИГНАЛА, ПОСТУПАЮЩЕГО НА АНТЕННУ МАЛОГАБАРИТНОЙ РЛС.....	28
1.2 АДАПТИВНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОМ КОМПЕНСАТОРЕ ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ.....	32
1.2.1 Метод непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы помехи.....	35
1.3 СИНТЕЗ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ АВТОКОМПЕНСАТОРА НА БАЗЕ «МАЛОЭЛЕМЕНТНОЙ» АНТЕННЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ.....	37
1.3.1 Формирование основного и вспомогательных каналов автокомпенсатора.....	37
1.3.2 Схема формирования вспомогательных каналов автокомпенсатора с использованием трех приемников.....	38
1.3.3 Анализ работы автокомпенсатора, вспомогательные каналы которого сформированы по схеме с использованием трех приемников.....	40
1.3.4 Схема формирования вспомогательных каналов автокомпенсатора с использованием четырех приемников.....	43

1.3.5 Анализ работы автокомпенсатора, вспомогательные каналы которого сформированы по схеме с использованием четырех приемников.....	45
1.3.6 Схема формирования вспомогательных каналов автокомпенсатора с использованием пяти приемников.....	56
1.3.7 Анализ работы автокомпенсатора, вспомогательные каналы которого сформированы по схеме с использованием пяти приемников.....	59
1.4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ОШИБОК ПРОЦЕССОРА УПРАВЛЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОКОМПЕНСАТОРА.....	61
1.5 ВЫВОДЫ.....	67
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕРЕОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ.....	69
2.1 ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА НА ВХОДЕ РПУ.....	69
2.1.1 Моделирование прямой компоненты сигнала.....	70
2.1.2 Моделирование квазизеркально отражённой компоненты сигнала.....	72
2.1.3 Моделирование диффузно рассеянного сигнала.....	75
2.2 МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА В СЛУЧАЕ АКТИВНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ.....	77
2.3 ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОКАНАЛА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	81
2.3.1 Возможности программного обеспечения.....	81
2.3.2 Параметры модели радиоканала.....	83
2.3.3 Результаты моделирования канала распространения переотраженных радиолокационных сигналов, излученных радиопередающей системой.....	87
2.3.4 Результаты моделирования канала распространения переотраженных радиолокационных сигналов в случае активной радиолокации.....	96
2.4 ВЫВОДЫ.....	104
3 МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЛЕТАЮЩЕЙ ЦЕЛИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕОТРАЖЕНИЙ.....	106
3.1 МЕТОД РЕЖЕКЦИИ ПЕРЕОТРАЖЁННЫХ СИГНАЛОВ.....	107
3.2 МЕТОД ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗНИЯ.....	111
3.3 МЕТОД МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ.....	116
3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	120
3.5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕОТРАЖЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕТАЮЩИХ И ЗАВИСШИХ ВЕРТОЛЕТОВ.....	123
3.5.1 Алгоритм обнаружения сигнала, отраженного несущими винтами вертолета, на фоне сигнала, отраженного от корпуса.....	125
3.5.2 Анализ эффективности распознавания при различных темпах обзора РЛС.....	127
3.6 ВЫВОДЫ.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	148