

На правах рукописи



Семенов Виталий Юрьевич

**МЕТОДЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
ДЛЯ АДАПТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ,
ОБНАРУЖЕНИЯ И ПЕЛЕНГАЦИИ ЦЕЛЕЙ**

1.3.4. – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

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

Научный консультант: **Флаксман Александр Григорьевич**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Официальные оппоненты: **Рабин Алексей Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
проректор по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург
Сидоркина Юлия Анатольевна
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автономные информационные и управляющие системы Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва
Джиган Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
г. Москва, г. Зеленоград

Ведущая организация: Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»,
г. Нижний Новгород

Защита состоится «01» апреля 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1594>

Автореферат разослан «_____» 2026 г.

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



Клюев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

На настоящем этапе развития науки и техники в области активных и пассивных локационных систем наблюдается смещение в сторону цифровой обработки сигналов, как метода и средства достижения необходимых технических характеристик соответствующих изделий. Одновременно с этим существует тенденция применения многоканальных приемо-передающих радиосистем для увеличения отношения сигнал-шум и возможности использования пространственной обработки сигналов. За последние 7-10 лет в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн фактически произошел переход от фазированных антенных решеток к полностью цифровым антенным решеткам, в которых трансформация аналоговых сигналов в цифровой код производится непосредственно сразу на несущей частоте. В отечественной промышленности в том числе гражданской за последние десять лет также начался переход к цифровым антенным решеткам. Однако крайне остро стоит проблема уменьшения времени выполнения и вычислительной сложности основных применяемых алгоритмов цифровой обработки сигналов. В частности, для подавления помех и пеленгации полезных источников — это проблема использования короткой выборки входного случайного процесса в каналах антенной решетки. Выборка считается короткой, если использованное число временных отсчетов для измерения корреляционной матрицы принятых антенной решеткой сигналов меньше числа антенных каналов.

Существует большое количество научных публикаций по методам обработки сигналов для подавления узкополосных помех в активных локационных системах. Большая часть из них посвящена различного рода автокомпенсаторам помех. Другая часть научных публикаций посвящена адаптивным антенным решеткам. Стоит выделить научные школы при Московском авиационном институте и Нижегородском НИИ радиотехники. При этом научных публикаций, в которых рассматриваются методы подавления помех в многолучевых решетках гораздо меньше. Еще скромнее обстоит ситуация с исследованиями по двумерному подавлению (одновременно по азимуту и углу места) в том числе для многолучевых диаграмм направленности. Экспериментально подтвержденная процедура адаптивного измерения самого числа действующих помех практически нигде даже не рассматривается.

Публикаций, связанных с подавлением в антенных решетках активных локаторов широкополосных и импульсных помех также достаточно. Здесь стоит выделить научные школы при университете ИТМО и Воронежском госуниверситете. Значительный объем публикаций посвящен аналогичной проблеме в пассивных локационных системах. Однако большинство из них имеют чрезвычайно высокую вычислительную сложность (так же, как и в случае узкополосных помех), что не позволяет их применять на практике в

режиме реального времени. Аналитического решения задачи построения весового вектора или весовой матрицы адаптивной пространственно-временной цифровой антенной решетки с возможностью оценки числа помех для случая короткой выборки нигде не приводится.

Область исследований связанных с пеленгацией полезных источников в пассивных локационных системах широко представлена в научных публикациях. Выделяются научные школы при Всероссийском НИИ радиотехники и Институте прикладной физики РАН. Основная их часть посвящена одномерной пеленгации по азимуту. Работ по двумерной пеленгации меньше. Телеметрические комплексы как класс пассивных локационных систем крайне редко становятся предметом научных исследований. Ключевой особенностью данного класса радиотехнических систем является проблема автоматического слежения и по азимуту, и по углу места (через пеленгацию) за полезным источником при наличии активных помех. При этом число полезных источников как правило измеряется через пороговую технику, что при наличии помех лишает ее смысла.

При отсутствии помех зачастую возникает задача сверхразрешения двух или более полезных источников как в случае одномерной, так и двумерной пеленгации. Публикаций, в которых аналитически выводится псевдоспектральная функция (функция неопределенности в осях азимут-угол места) и экспериментально подтверждаются ее свойства сверхразрешения по обоим угловым координатам в случае коррелированных источников крайне мало. Для случая короткой выборки универсального решения для автоматического измерения числа полезных источников, в том числе попадающих в главный луч диаграммы направленности, в научной литературе не представлено.

Задача двумерной пеленгации весьма актуальна и для активных локационных систем. За счет применения антенных решеток последние 5-7 лет радиопеленгация начала играть огромную роль в радарах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн. В указанных системах ближней радиолокации становится возможным значительное увеличение точности измерения дальности, и пеленга. При этом существуют свои особенности в радиоканале, связанные с эффектом затухания радиоволн и отражения от подстилающей поверхности. Активно начали применять МИМО радары в системах автоматического обнаружения и предупреждения о критических ситуациях, дальность обнаружения целей в которых около 300 метров. Поэтому их также считают радарами ближнего радиуса действия. Основная направленность научных публикаций в данной области - это увеличение точности пеленгации целей в зоне обслуживания радара и их сверхразрешение при одновременном нахождении в главном луче диаграммы направленности. Стоит отдельно отметить в этой области научную школу при Нижегородском техническом университете им. Р.Е. Алексеева.

Последние 3-5 лет самой исследуемой задачей в активных локаторах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн (в том числе автомобильных МИМО радарах, где с разных передающих каналов

излучаются разные зондирующие сигналы в одной полосе частот) является проблема одновременного обнаружения ближних и дальних целей на дистанции обслуживаемой радаром. Ближними целями в данном классе радаров называются объекты, располагающиеся на дальностях до 30 метров, дальними – от 150 метров до 300 метров. Известно, что в миллиметровом диапазоне длин волн антенные решетки становятся возможным изготавливать компактными, т.е. их габариты малы. По этой причине локаторы ближнего действия за рубежном начали массово применять в различных секторах народного хозяйства. В связи с этим начали усложняться помеховые условия и возникла проблема подавления разнородных помех перед обнаружением полезных целей.

В первую очередь помехи возникают от функционирования аналогичных радаров ближнего действия. Помехи, присутствующие в радиоканале, могут иметь различную модуляцию и длительность во времени. Отечественных публикаций в данной области крайне мало. Частично это может быть объяснено тем, что алгоритмы, связанные с подавлением помех, как правило, имеют повышенную вычислительную сложность. Поэтому для решения проблемы помехозащищенности и детектирования целей прежде всего следует разрабатывать упрощенные с вычислительной точки зрения методы цифровой обработки сигналов.

Известно, что оптимальным решением для обнаружения цели при отсутствии или наличии помех является оптимизация функций максимального правдоподобия. Как правило поиск оптимума данной функции – это вычислительно затратная процедура, связанная с перебором возможных вариантов значений параметров модели входного процесса. Именно поэтому на сегодняшний день в данной области отечественной науки весьма остро строит проблема создания «квазиоптимальных» или «инженерных» методов одновременного обнаружения ближних и дальних целей в локаторах ближнего действия и автомобильных ММО радарах.

Основным направлением решения научных проблем, касающихся двумерного подавления помех (узкополосных и широкополосных), двумерной пеленгации целей и их обнаружения в сложной сигнально-помеховой обстановке является применение многоканальных антенных решеток. В связи с тем, что шумы приемных трактов, полезные сигналы и сами помехи в общем случае являются случайными процессами в задачах пространственно-временной цифровой обработки сигналов возникает необходимость измерения корреляционной матрицы сигналов, принимаемых антенной решеткой, через статистическое среднее. Как правило это первый шаг обработки сигналов, который требует операций умножения комплексных чисел и сложения.

Чем больше длина выборки при измерении корреляционной матрицы, тем точнее ее оценка (т.е. ближе к истинной корреляционной матрице). С другой стороны, с увеличением длины выборки возрастает и вычислительная сложность данной процедуры, причем пропорционально квадрату числа антенных каналов. По указанной причине при реализации алгоритма в

вычислительных микросхемах возникает острая необходимость в уменьшении длины выборки.

В случае, если длина выборки при измерении корреляционной матрицы меньше, чем число антенных каналов, измеренная матрица становится вырожденной, а ее определитель равен нулю. В таком случае классическое обращение измеренной корреляционной матрицы становится невозможным. При этом традиционные методы подавления помех требуют обращения матрицы. Поэтому в случае короткой выборки возникает необходимость регуляризации корреляционной матрицы помех перед обращением.

В пеленгации (в простейшем случае при отсутствии помех) для расчета традиционными не параметрическими методами псевдоспектральной функции со свойствами сверхразрешения также требуется обращение корреляционной матрицы уже полезных сигналов. Если выборка короткая, то также необходима процедура регуляризации. Однако из-за различных статистических свойств помех и полезных сигналов процедуры регуляризации в общем случае отличаются.

Если регуляризация корреляционной матрицы помех проведена, то при классическом подходе к подавлению помех расчет весового вектора адаптивной антенной решетки все равно предполагает обращение матрицы. Из теории матриц известно, что эта процедура еще более вычислительно сложная, чем расчет самой корреляционной матрицы, число умножений пропорционально кубу размерности матрицы. Возникает необходимость поиска альтернативных методов обращения с уменьшенной вычислительной сложностью. Одним из направлений является поиск обратной матрицы через всевозможные разложения по собственным, сингулярным, а также степенным векторам измеренной корреляционной матрицы.

Вычислительная сложность расчета псевдоспектральной функции для большинства современных методов пеленгации пропорциональна кубу размерности корреляционной матрицы полезных сигналов. Однако здесь существует еще другая проблема. Многие современные вычислительные микросхемы (в первую очередь сигнальные процессоры) напрямую не поддерживают программных функций обращения матриц (библиотек). В том числе по указанной причине возникла проблема поиска альтернативных методов для расчета псевдоспектральных функций в пеленгации. Здесь одним из направлений решения является расчет псевдоспектральной функции с помощью использования характеристического или минимального многочленов корреляционной матрицы полезных сигналов.

Актуальность выбранной темы диссертационной работы подтверждается бурным развитием локационной техники и устройств для помехоподавления и пеленгации за последние 5-10 лет. Однако в данной области имеется нерешенная научная проблема. Это синтез единой группы методов обработки сигналов на базе цифровых антенных решеток активных и пассивных локационных систем с малым временем адаптации для получения результатов измерения пеленгов, также расчета порогов обнаружения целей и весовых векторов для подавления помех. Применение набора отдельных

существующих методов как правило увеличивает время вычислений или требует различной архитектуры вычислительных устройств.

В настоящей диссертации автор для решения указанной научной проблемы ставит перед собой ряд достаточно узких теоретических задач, связанных с уменьшением вычислительной сложности пространственно-временной цифровой обработки сигналов для измерения числа различного типа помех, их подавления с последующим обнаружением целей, измерением числа полезных источников и их пеленгацией в том числе в условиях сверхразрешения.

Общей методикой, позволяющей объединить группу методов для решения указанной научной проблемы, является использование короткой выборки при измерении корреляционной матрицы случайных процессов, принимаемых антенными решетками, с последующей ее регуляризацией и постобработкой, связанной с расчетом минимального многочлена и степенных векторов.

Цель и задачи работы

Целью работы является развитие единого теоретического подхода к созданию методов для подавления помех, обнаружения и пеленгации целей в активных и пассивных локационных системах, способных функционировать в режиме реального времени и адаптивно подстраиваться под сигнально-помеховую обстановку в условиях короткой выборки входного случайного процесса.

Задачи работы.

1. Разработать метод двумерного подавления узкополосных помех для короткой выборки и с малой вычислительной сложностью для многолучевых антенных решеток активных локационных систем с адаптивным измерением числа действующих помех.

2. Развить теорию пространственно-временного адаптивного подавления широкополосных непрерывных и импульсных помех с помощью антенных решеток активных и пассивных локаторов с возможностью ее применения на отечественной элементной базе.

3. Синтезировать систему двумерной пеленгации для пассивного локационного комплекса с автоматическим обнаружением и сопровождением подвижных объектов в условиях воздействия узкополосных помех, способную адаптивно измерять как число подвижных объектов, так и число действующих помех.

4. Разработать математическую модель цифровой обработки сигналов в МИМО-радаре ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн и метод формирования виртуальных каналов для одномерной и двумерной пеленгации целей, применимый для внедрения в современные ADAS-системы.

5. Синтезировать систему одновременного обнаружения ближних и дальних целей с помощью антенной решетки радара ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн, работающего в условиях воздействия активных разнородных узкополосных помех.

Научная новизна

1. Впервые аналитически решена задача расчета весового вектора для подавления узкополосных помех с автоматической оценкой их числа в многолучевой адаптивной антенной решетке при короткой выборке. Для регуляризации решения не требуется априорного знания статистики помех и собственных шумов. Регуляризация корреляционной матрицы помех производится за счет поиска максимума отношения сигнал-шум на выходе антенной решетки. Экспериментально подтверждена верность расчетов.

2. Развита теория пространственно-временной компенсации широкополосных помех с автоматической оценкой их числа, в том числе импульсных, подходящая для применения в составе и многоканальных автокомпенсаторов, и адаптивных антенных решеток. Получены аналитические выражения для весовых матриц для случая короткой выборки и уменьшенной вычислительной сложности, т.е. способных функционировать в режиме реального времени на отечественной элементной базе. Регуляризация решения производится за счет поиска максимума отношения сигнал-шум на выходе антенной решетки.

3. Разработана новая система двумерной пеленгации с помощью антенной решетки с возможностью сверхразрешения при короткой выборке для пассивного локационного комплекса с автоматическим распознаванием и сопровождением подвижных объектов в условиях воздействия активных узкополосных помех. Регуляризация сигнальной корреляционной матрицы производится за счет пороговой техники соответствующей заданной вероятности ложных тревог. Экспериментально подтверждена точность пеленгации, возможность сверхразрешения, вероятность правильного измерения числа полезных источников, возможность измерения числа действующих помех.

4. Аналитически и экспериментально подтверждена возможность формирования виртуальных приемных каналов в MIMO-радарах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн для одномерной пеленгации со сверхразрешением при короткой выборке в азимутальной плоскости без использования декодера на приемной стороне. Регуляризация решения производится за счет пороговой техники соответствующей заданной вероятности ложных тревог. Решена задача двумерной пеленгации со сверхразрешением при короткой выборке с большим числом передающих и приемных каналов в условиях коррелированности целей.

5. Разработана новая система одновременного обнаружения ближних, дальних, помеховых и не помеховых целей в радарах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн с помощью горизонтальной

линейной антенной решетки. Предложены методы с уменьшенной вычислительной сложностью для максимально-правдоподобной оценки локационного радиоканала при отсутствии и наличии помех. Показано, что система устойчива к воздействию как частотно-модулированных, так и фазоманипулированных помех.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость состоит в следующем:

1. Предложена методика расчета весовых векторов для подавления узкополосных помех в многолучевых антенных решетках активных локаторов и методика расчета числа действующих помех, которые не требуют процедуры прямого обращения корреляционной матрицы.

2. Развита теория пространственно-временного адаптивного подавления широкополосных помех (в том числе импульсных) в многоканальных автокомпенсаторах и адаптивных антенных решетках активных и пассивных локаторов, которая позволяет аналитически рассчитывать весовые вектора без использования операции прямого обращения корреляционной матрицы.

Практическая значимость состоит в следующем:

1. Разработанные и запатентованные методы одномерного и двумерного подавления узкополосных и широкополосных помех в активных и пассивных локаторах позволяют не только в автоматическом режиме подавлять помехи и оценивать их число, но и могут быть реализованы на отечественной элементной базе за счет уменьшенной вычислительной сложности и малого времени адаптации.

2. Разработанные и запатентованные методы одномерной и двумерной пеленгации подвижных объектов в пассивных локационных комплексах с автоматическим слежением и активных МИМО-радарах позволяют получить высокую точность пеленгации в условиях коррелированности целей и наличия помех, измерить число целей при их нахождении в том числе в зоне сверхразрешения. Данные методы имеют уменьшенную вычислительную сложность и могут быть реализованы на отечественной элементной базе.

3. Разработанные методы одновременного обнаружения ближних и дальних целей в радарах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн в условиях сложной помеховой обстановки позволяют уменьшить вероятность пропуска целей и правильно измерять количество целей.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач в работе были использованы методы статистической радиофизики, методы математического анализа, методы матричной алгебры, методы цифровой адаптивной обработки сигналов, методы радиофизических измерений и методы компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Узкополосные помехи могут быть эффективно подавлены в многолучевой двумерной антенной решетке методом, функционирующим в составе радара импульсного типа. Метод работает в случае короткой выборки помехи и обладает вычислительной сложностью, линейно зависящей от числа помех, выборок, лучей и квадратично зависящей от числа антенных каналов. Экспериментальное исследование метода показало наличие потерь в отношении сигнал-шум не более 2 дБ относительно идеального подавления.

2. Развитие теории пространственно-временного подавления широкополосных непрерывных и импульсных помех с помощью адаптивной антенной решетки или адаптивного компенсатора из состава импульсно-доплеровского радара или пассивного локационного комплекса за счет разложения обратной корреляционной матрицы помех по ограниченному числу степенных матриц позволяет аналитически рассчитывать весовые векторы в случае короткой выборки помехи с возможностью автоматического измерения эффективного числа помех, действующих в эфире.

3. Запатентованная и экспериментально исследованная система двумерной пеленгации со сверхразрешением и автоматическим сопровождением коррелированных целей в условиях воздействия узкополосных помех с помощью антенной решетки пассивного локационного комплекса дециметрового диапазона длин волн обеспечивает точность пеленгации не более 0,39 в долях ширины диаграммы направленности и вероятность правильного измерения числа полезных источников не менее 0,6.

4. Одномерная и двумерная пеленгация коррелированных целей с возможностью оценки их числа и сверхразрешения в МИМО-радаре ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн может быть выполнена методом формирования виртуальных приемных каналов. Метод обладает экспериментально подтвержденной высокой точностью пеленгации, составляющей не более 0,03 в долях ширины диаграммы направленности.

5. Ближние и дальние цели могут быть одновременного обнаружены на дальности до 300 метров в условиях одновременного воздействия узкополосных фазоманипулированных и частотно-модулированных помех с вероятностью пропуска целей и вероятностью ложных тревог менее 0,01 с помощью системы в составе радара ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн и метода максимально-правдоподобной оценки импульсной характеристики радиоканала

Степень достоверности и апробация результатов

Обоснованность и достоверность. Обоснованность теоретических положений диссертационного исследования основывается на использовании классической статистической радиофизики, методов теории вероятностей,

математической статистики, статистической радиотехники, теории матриц, теории распространения радиоволн, теории антенн, методах радиофизических измерений, цифровом спектральном анализе и теоретической радиолокации.

Обоснованность экспериментальных положений диссертационного исследования базируется на методах математического моделирования и натурных 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.

Апробация результатов и публикации. По теме диссертации автором опубликовано 60 работ: 25 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, из них 16 статей по специальности 1.3.4 «Радиофизика»; 9 патентов РФ на изобретения и свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ; 6 монографий; 2 доклада в материалах международных научных конференций; 12 докладов в материалах всероссийских научных конференций; 6 докладов и тезисов докладов в сборниках трудов региональных научных конференций.

Внедрение результатов работы. В диссертации содержатся результаты, которые внедрены в пассивных радиотелеметрических комплексах «Пеленг-ОФМ» и «Интерлюдия», разработанных и изготовленных Филиалом ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» и АО «Конструкторское бюро «Кунцево».

Личный вклад автора

9 работ из 60 опубликованы без соавторов. В остальных работах диссертант принимал непосредственное участие как в постановке задач, так и в расчётах, построении аналитических моделей, выводе формул, экспериментах и обработки их результатов, обсуждении и физической интерпретации результатов

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка сокращений. Общий объем диссертации 352 страницы, включая 149 рисунков и список литературы из 215 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы диссертации, изложено современное состояние подобных исследований в Российской Федерации и за рубежом, проведен обзор литературы по теме диссертации, приведены результаты выносимые на защиту.

В **Первой главе** выполнен синтез методов двумерного подавления узкополосных помех с уменьшенной вычислительной сложностью в однолучевых и многолучевых антенных решетках импульсных радаров, а также методов оценки числа помех. Предлагается подход к пространственной обработке сигналов, основанный на разложении помеховой корреляционной матрицы по ортогональным степенным векторам. Отдельно рассмотрен случай короткой выборки при измерении корреляционной матрицы помех и процедура ее регуляризации. Оценена вычислительная сложность методов.

В Разделе 1.1 рассматривается адаптивная антенная решетка (АР), обеспечивающая максимальное отношение мощности сигнала к средней мощности шума (ОСШ) (см. Рис. 1) на ее выходе [1]. Предложено регуляризовать измеренную корреляционную матрицу (КМ) помех через максимум ОСШ (1)

$$\eta = |\hat{\mathbf{W}}^H \mathbf{S}|^2 (\hat{\mathbf{W}}^H \mathbf{M}_r \hat{\mathbf{W}})^{-1}, \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{W}}$ - весовой вектор АР, \mathbf{S} - вектор-фазор полезного сигнала, \mathbf{M}_r - регуляризованная КМ помех. Выведено аналитически выражение (2) для весового вектора адаптивной АР в виде взвешенной суммы по степенным векторам КМ помех с автоматическим измерением числа помех K

$$\mathbf{W} = c_0 \mathbf{F}_0 + c_1 \mathbf{F}_1 + \dots + c_{K-1} \mathbf{F}_{K-1}, \quad (2)$$

где c_i - весовые коэффициенты, $i = 0..(K-1)$.

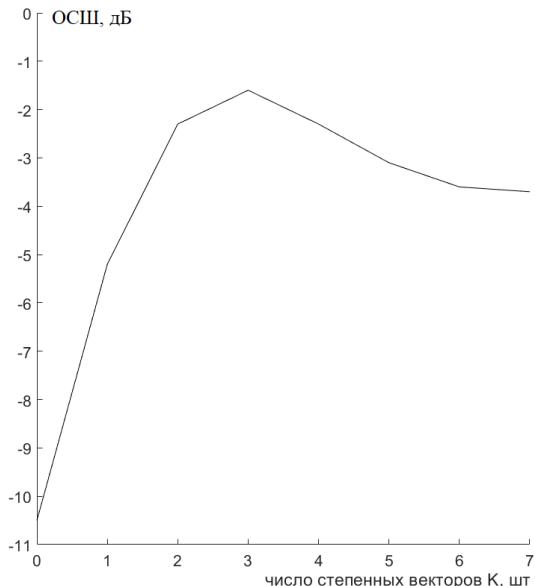


Рис. 1. ОСШ в зависимости от числа степенных векторов при точно известной КМ.

кода Баркера длиной 11. В обоих случаях помеху можно считать узкополосной. Для формирования зондирующего сигнала использовался имитатор кода Баркера на 11. Данный тип зондирующего сигнала очень часто применяется в активной радиолокации. Впервые экспериментально подтверждена предложенная формула для регуляризации КМ помех (3) в случае короткой выборки.

В Разделе 1.2 производится обработка и анализ результатов натурного эксперимента по двумерному (по азимуту и углу места) подавлению помех в активном радаре дециметрового диапазона длин волн [2]. В состав радара входит адаптивная АР, полотно которой имеет прямоугольную топологию (8 каналов по горизонтали и 4 по вертикали). В качестве постановщиков помех использовались генератор непрерывного тонального сигнала (синуса), а также генератор фазоманипулированного сигнала –

$$\mathbf{M}_r = \hat{\mathbf{M}} + (1 + \sum_{k=1}^K |c_k|) \mathbf{I}, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{M}} = (1/L) \sum_{j=1}^L \mathbf{X}(j) \mathbf{X}^H(j)$ - измеренная КМ по L - выборкам, \mathbf{X} - вектор принятого помехового процесса размерностью $[Nx1]$, где N - число антенных каналов в АР, \mathbf{I} - единичная матрица. Проанализирован набор сценариев подавления помехи как по азимуту ϕ , так и по углу места θ . Во всех сценариях присутствовала одна помеха и один полезный сигнал. Для каждого из них при короткой выборке ($L < N$) выполнялось измерение потерь в ОСШ, диаграммы направленности (ДН) адаптивной АР (см. Рис. 2а) и оценка числа помех (см. Рис. 2б) $J=K-1$.

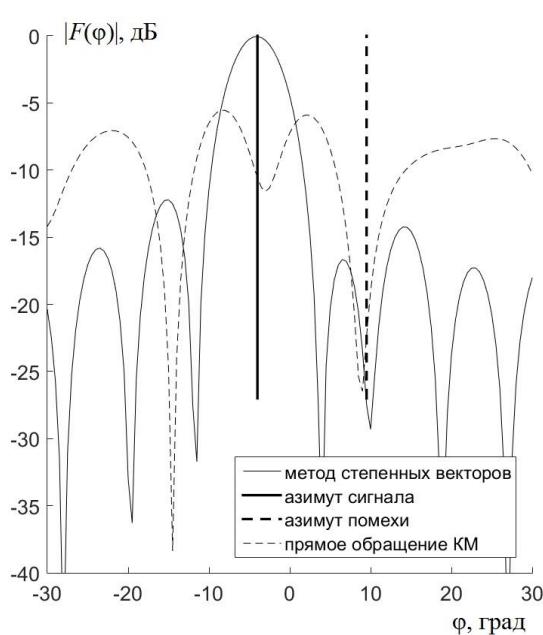


Рис. 2а. Диаграмма направленности ААР.

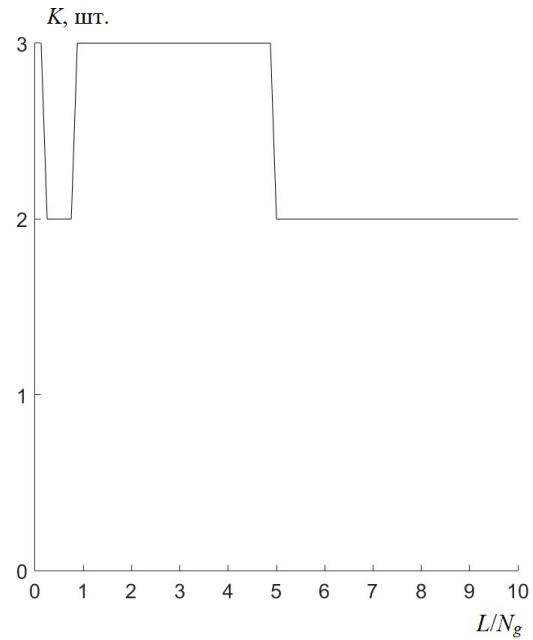


Рис. 2б. Сформированное число степенных векторов.

В Разделе 1.3 рассматривается многолучевая адаптивная АР, формирующая большое число лучей для параллельного или последовательного обзора пространства и обеспечивающая максимальное ОСШ на ее выходе [3]. Получено аналитически выражение (4) для весового вектора в i -м луче адаптивной АР в направлении \mathbf{S}_i .

$$\mathbf{W} = \sum_{k=1}^N s_{ik} \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{q}_k = \sum_{k=1}^N s_{ik} \mathbf{V}_k, \quad (4)$$

где s_{ik} - это k -тый элемент i -го вектора фазора \mathbf{S}_i . Физический смысл такой обработки сигналов заключается в том, что в начале обеспечивается подавление помех в каждом элементе АР (5). Затем выполняется весовое суммирование для максимизации ОСШ на выходе i -го луча АР

$$\hat{\mathbf{M}} \mathbf{V}_i = \mathbf{q}_i, \quad (5)$$

где единичный вектор \mathbf{q}_i имеет единицу в одной позиции с номером i и нули в остальных позициях. Процедура регуляризации КМ происходит с помощью предложенной формулы (3). Приводятся результаты численного

моделирования потерь в ОСШ (см. Рис. 3а) и числа образованных степенных векторов (см. Рис. 3б) в зависимости от использованного числа выборок L .

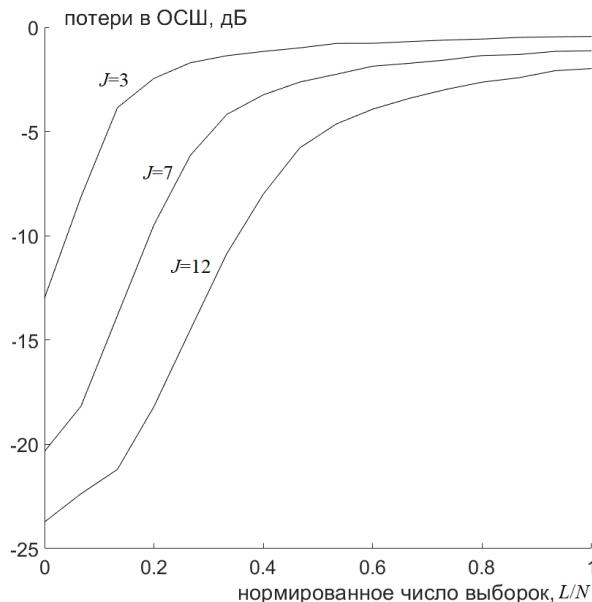


Рис. 3а. Потери в ОСШ в зависимости от нормированного числа выборок.

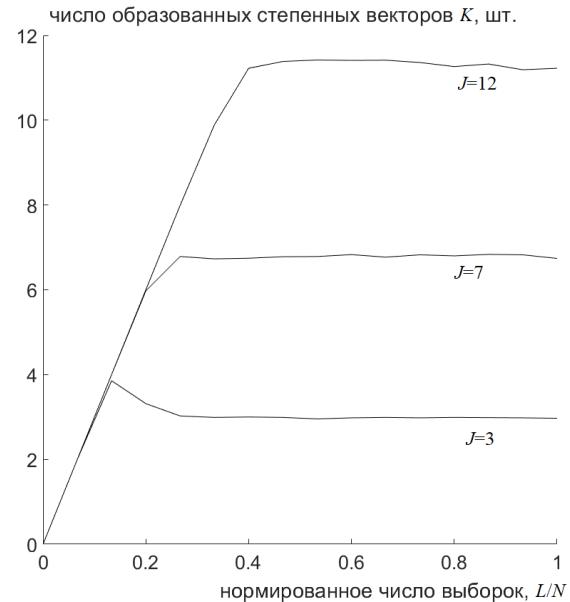


Рис. 3б. Число образованных степенных векторов в зависимости от нормированного числа выборок.

В **Второй главе** рассматриваются методы подавления широкополосных стационарных и импульсных помех уменьшенной вычислительной сложности в активных радарах и пассивных локационных системах с помощью пространственно-временных компенсаторов и адаптивных антенных решеток. Отдельно рассмотрен случай короткой выборки при измерении корреляционной матрицы широкополосных помех и процедура ее регуляризации.

В Разделе 2.1 рассматривается одноканальный автocomпенсатор широкополосной помехи на основе адаптивного трансверсального фильтра, обеспечивающий минимальную выходную мощность помехи на фоне тепловых шумов [4], [5]. Выведено выражение (6) для весового вектора

$$\hat{\mathbf{W}} = -\hat{\mathbf{R}}^{-1}\hat{\mathbf{P}} = -\left(\sum_{k=1}^{J'} \frac{1}{\hat{\lambda}_k} (\hat{\mathbf{U}}_k^H \hat{\mathbf{P}}) \hat{\mathbf{U}}_k + \sum_{k=J'+1}^T \frac{1}{\hat{\lambda}_k} (\hat{\mathbf{U}}_k^H \hat{\mathbf{P}}) \hat{\mathbf{U}}_k \right), \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{R}}$ - это измеренная КМ помехи в компенсационных отводах линии задержки, $\hat{\mathbf{P}}$ -измеренный корреляционный вектор между входом в линию задержки и компенсационными отводами, J' –число собственных чисел $\hat{\lambda}_k$ и собственных векторов $\hat{\mathbf{U}}_k$ матрицы $\hat{\mathbf{R}}$, T – число элементов в линии задержки. Основное преимущество предлагаемого трансверсального фильтра широкополосных помех заключается в адаптивной оценке эффективного числа помех и занимаемой ими полосы частот.

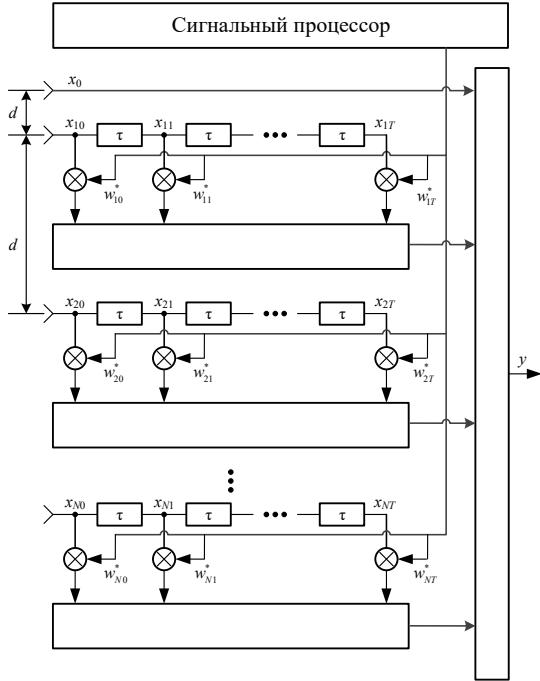


Рис. 4. Структура пространственно-временного адаптивного компенсатора широкополосных помех.

В Разделе 2.2 рассмотрен многоканальный пространственно-временной адаптивный автокомпенсатор широкополосных помех (АКШП), обеспечивающий на выходе минимальную среднюю мощность помех [6]. Предложена структура многоканального адаптивного автокомпенсатора широкополосных помех (АКШП), обеспечивающего на выходе минимальную среднюю мощность помех (см. Рис. 4). Впервые предложен и получен аналитически (7) критерий регуляризации КМ широкополосных помех при разложении весового вектора по степенным векторам

$$\hat{I}_{\min}(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |y(l, k)|^2 + \sigma_0^2 \cdot \sum_i^k c_i^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |x_0(l) + \hat{\mathbf{W}}^H(k) \mathbf{X}(l)|^2 + \sigma_0^2 \cdot \sum_i^k c_i^2, \quad (7)$$

где x_0 - сигнал на неуправляемом входе АКШП, \mathbf{x} - вектор сигналов на компенсационных входах АКШП, σ_0^2 - мощность собственных (тепловых) шумов. Таким образом процедура формирования степенных векторов должна заканчиваться, когда в минимуме $\hat{I}_{\min}(k)$.

В Разделе 2.3 рассматривается одноканальный фильтр на основе адаптивного трансверсального фильтра, обеспечивающий на выходе максимальное отношение мощности полезного сигнала к мощности активных помех на фоне тепловых шумов. Считается, что на фильтр воздействуют широкополосные помехи, что на практике является достаточно сложным случаем. Данная проблема характерна для радиолокационных систем и систем радиоэлектронной борьбы [4], [7]. Получено аналитическое решение для оптимального весового вектора адаптивного фильтра, на основе которого построен адаптивный алгоритм формирования амплитудно-частотной характеристики фильтра. Предложен практический подход по внедрению степенного метода в программное обеспечение.

В Разделе 2.4 рассмотрена многоканальная пространственно-временная адаптивная антенная решетка, принимающая широкополосный полезный сигнал на фоне широкополосных помех, излучаемых разнесенными по угловой координате источниками [8], [9], [10]. Ее структура отличается от АКШП отсутствием неуправляемого канала x_0 (см. Рис. 4). Впервые аналитически предложена процедура (8) регуляризации КМ широкополосных помех

$$\hat{\mathbf{M}}_r = \hat{\mathbf{M}} + \text{diag}\left(\left[|\hat{\mathbf{W}}_0|^2, |\hat{\mathbf{W}}_1|^2, \dots, |\hat{\mathbf{W}}_T|^2\right]\right) \times \frac{(k + NT)\sigma_0^2}{NT}, \quad (8)$$

k -номер сформированного степенного вектора, $\text{diag}\{\}$ – оператор преобразующий вектор-столбец в матрицу на главной диагонали которой он располагается, остальные элементы равны нулю, $\hat{\mathbf{W}}_t$ - весовые вектора на входе t -го элемента задержки.

Приводятся результаты моделирования (см. Рис. 5), в виде отклика адаптивной широкополосной АР в плоскости частота-азимут для различного числа широкополосных помех и при короткой выборке.

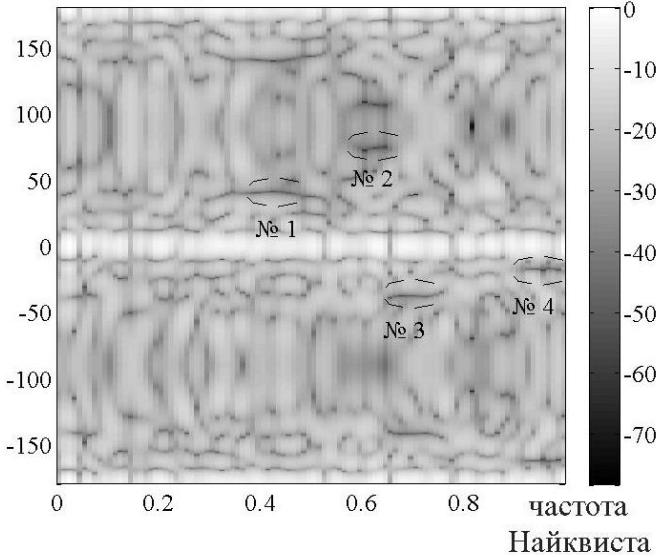


Рис. 5. Отклик адаптивной широкополосной антенной решетки в плоскости частота-азимут.

превышение которого является моментом прекращения. Получены регуляризованные оценки весовых коэффициентов АКШП по ограниченному числу выборок входного процесса. Регуляризация КМ проводилась с помощью (7).

В Разделе 2.6 рассмотрена многоканальная пространственно-временная адаптивная АР, принимающая широкополосный полезный сигнал на фоне импульсных (прерывных во времени) широкополосных помех [11]. Предложен метод подавления импульсных широкополосных помех на фоне приема широкополосного полезного сигнала в адаптивной антенной решетке при короткой выборке и предложенном способе регуляризации КМ (8). Приведенные результаты численного моделирования процедуры адаптации к помеховой обстановке во времени и выделении полезного сигнала (см. Рис. 6а), а также числа сформированных степенных векторов в зависимости от длительности присутствия широкополосной помехи в эфире (см. Рис. 6б).

В Разделе 2.5 рассмотрен многоканальный адаптивный автокомпенсатор импульсных (прерывных во времени) широкополосных помех, обеспечивающий минимальную среднюю мощность помех на выходе [11]. Предложена модель импульсных широкополосных помех, работающая по схеме с использованием параметра отсечки P , в качестве порога,

появления или ее прекращения. Получены регуляризованные оценки весовых коэффициентов АКШП по ограниченному числу выборок входного процесса. Регуляризация КМ проводилась с помощью (7).

В Разделе 2.6 рассмотрена многоканальная пространственно-временная адаптивная АР, принимающая широкополосный полезный сигнал на фоне импульсных (прерывных во времени) широкополосных помех [11]. Предложен метод подавления импульсных широкополосных помех на фоне приема широкополосного полезного сигнала в адаптивной антенной решетке при короткой выборке и предложенном способе регуляризации КМ (8). Приведенные результаты численного моделирования процедуры адаптации к помеховой обстановке во времени и выделении полезного сигнала (см. Рис. 6а), а также числа сформированных степенных векторов в зависимости от длительности присутствия широкополосной помехи в эфире (см. Рис. 6б).

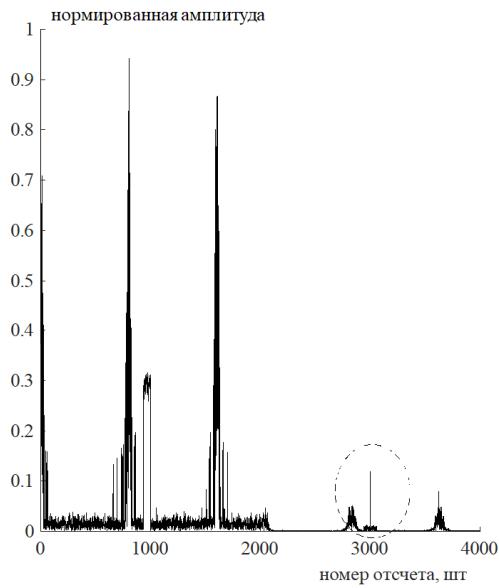


Рис. 6а. Подавление импульсных широкополосных помех во времени и выделение полезного широкополосного сигнала.

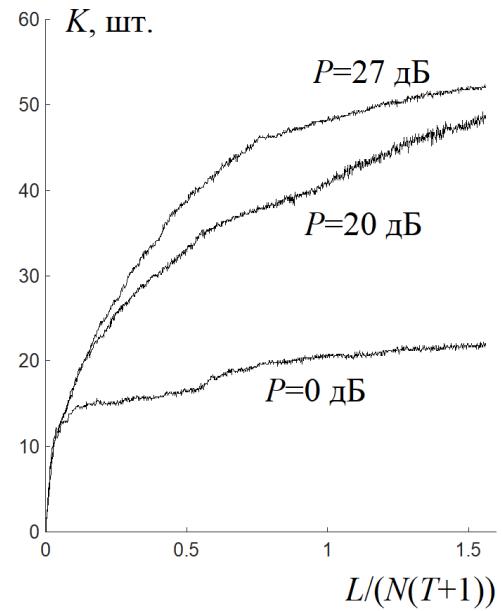


Рис. 6б. Число образованных степенных векторов в адаптивной широкополосной АР в зависимости от нормированного числа выборок

В Разделе 2.7 рассматривается проблема обеспечения помехозащищенности телеметрических комплексов наземного базирования в местах эксплуатации. Одним из наиболее мешающих типов помех являются мощные узкополосные стационарные телевизионные помехи [12]. Предложено решение указанной проблемы за счет использования многоканального автокомпенсатора с нестандартным расположением компенсационных каналов, которые удалены на значительное расстояние (более 10 длин волн) относительно основного канала, что значительно уменьшает коэффициент корреляции помехи между основным каналом и компенсационными.

В **Третьей главе** рассматриваются методы двумерной пеленгации источников полезной информации в пассивной локационной системе на базе антенной решетки в условиях воздействия узкополосных помех или их отсутствия. Предлагается подход для пространственной обработки сигналов в таких системах, основанный на аппроксимации минимального многочлена корреляционной матрицы принимаемых полезных сигналов, который допускает использование короткой выборки при оценке этой матрицы, предложена процедура ее регуляризации. Проведен анализ обработки результатов натурных экспериментов.

В Разделе 3.1 Рассматривается задача пассивной двумерной радиопеленгации антенной решеткой, приподнятой над земной поверхностью. Источником полезного сигнала является движущийся воздушный объект. С борта воздушного объекта передается телеметрическая информация, которая впоследствии подвергается демодуляции. Для получения максимального отношения сигнал-шум одной из основных задач телеметрического комплекса является непрерывная пеленгация воздушного объекта для формирования главного луча диаграммы направленности на этот

объект механическим или электрическим способом [13]. Для решения задачи пеленгации предлагается применить существующий метод аппроксимации минимального многочлена корреляционной матрицы (9) и (10).

$$\hat{\mathbf{P}}^{(n)} = \left[\prod_{p=1}^{\hat{j}} (\mathbf{I} - \gamma_p \hat{\mathbf{M}}) \right] \cdot \left[\prod_{p=1}^{\hat{j}} \left(1 - \frac{\gamma_p}{\gamma_{\hat{j}+1}} \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$\eta(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{S}^H(\phi, \theta) \hat{\mathbf{P}}^{(n)} \hat{\mathbf{P}}^{(n)H} \mathbf{S}(\phi, \theta)}. \quad (10)$$

Данный метод обладает свойствами сверхразрешения, способен адаптивно оценивать число источников в эфире и работает в случае короткой выборки. Однако в случае короткой выборки данный метод требует регуляризации. Ее предлагается проводить исходя из необходимой заданной заранее вероятности ложных тревог при обнаружении полезного сигнала на фоне тепловых шумов и отсутствия помех. Выполнено численное моделирование. Моделирование показало, что при использовании процедуры сглаживания КМ предложенный метод пеленгации и регуляризации способен разрешать три источника, находящихся в главном луче ДН как по азимуту, так и по углу места (см. Рис. 7а). При этом предложенный метод пеленгует и мнимые источники, возникающие из-за отражения от земной поверхности. В то же время традиционный метод MUSIC (см. Рис. 7б) в одинаковых условиях не разрешает источники.

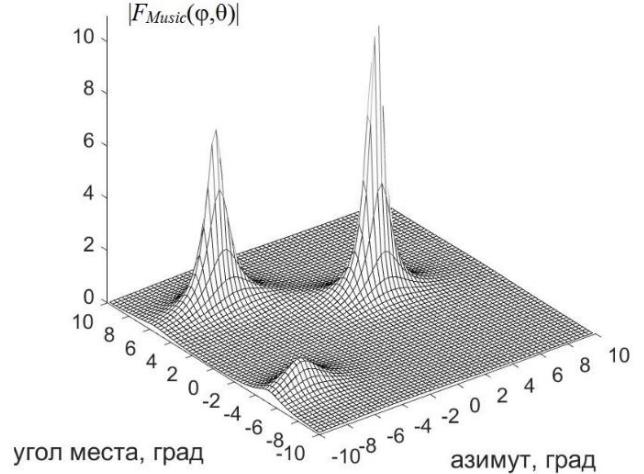
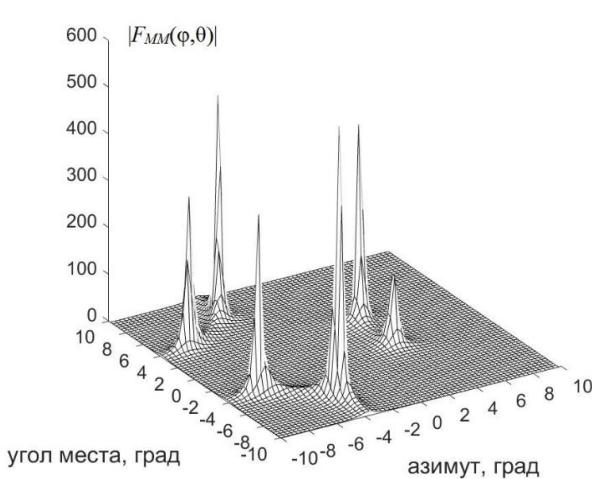


Рис. 7а. Функция неопределенности для трех целей в главном луче ДН при наличии отражения от земли (метод минимального многочлена).

Рис. 7б. Функция неопределенности для трех целей в главном луче ДН при наличии отражения от земли (метод MUSIC).

В Разделе 3.2 производится обработка и анализ результатов натурного эксперимента по двумерной пеленгации (по азимуту и углу места) источников информации в радиотелеметрическом комплексе дециметрового диапазона длин волн (см. Рис. 8а).



Рис. 8а. Внешний вид локатора во время эксперимента.

В состав комплекса входит адаптивная АР, полотно которой имеет прямоугольную топологию (8 антенных каналов по горизонтали и 4 по вертикали). В качестве источников используются как тональный сигнал, так и наиболее востребованный в современных комплексах фазоманипулированный сигнал (кода Баркера на 11). Рассмотрены сценарии, когда в эфире присутствуют один, два или три источника в разных угловых положениях. Особое внимание было уделено случаям, когда два источника находились в главном луче диаграммы направленности (случай сверхразрешения) [14]. Экспериментально подтверждена предложенная аналитически (11) процедура регуляризации сигнальной КМ за счет пороговой техники (12)

$$\min_{m, \gamma_n} \|(\mathbf{I} - \gamma_1 \hat{\mathbf{M}})(\mathbf{I} - \gamma_2 \hat{\mathbf{M}}) \dots (\mathbf{I} - \gamma_m \hat{\mathbf{M}})\|^2 < Th, \quad (11)$$

$$Th = \langle I_0^{(1)} \rangle + \chi \sigma_1 = \frac{N}{(1+L/N)} + \chi \frac{2}{(1+L/N)^2} \left(1 + \frac{2N}{L} \right), \quad (12)$$

где γ_i – рассчитываемые коэффициенты аппроксимации минимального многочлена КМ, m – степень аппроксимирующего полинома, которая характеризует число полезных источников, χ – параметр регуляризации. Результаты обработки эксперимента показали, что при отсутствии помех для широкого ряда значений ОСШ и угловой ориентации полезных сигналов параметр регуляризации достаточно выбирать $\chi=0$. Впервые экспериментально получено подтверждение (на Рис 8б изображено сечение функции неопределенности в азимутальной плоскости) сверхразрешающих свойств предложенного метода в случае короткой выборки, а также близкой к единице вероятности правильной оценке числа целей. Ширина диаграммы

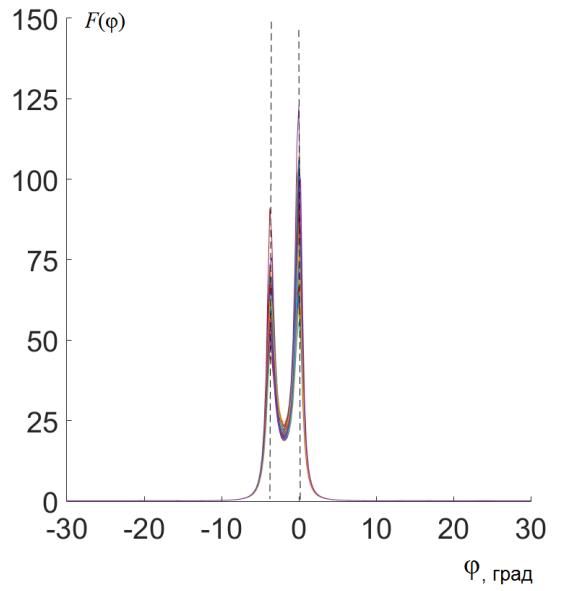
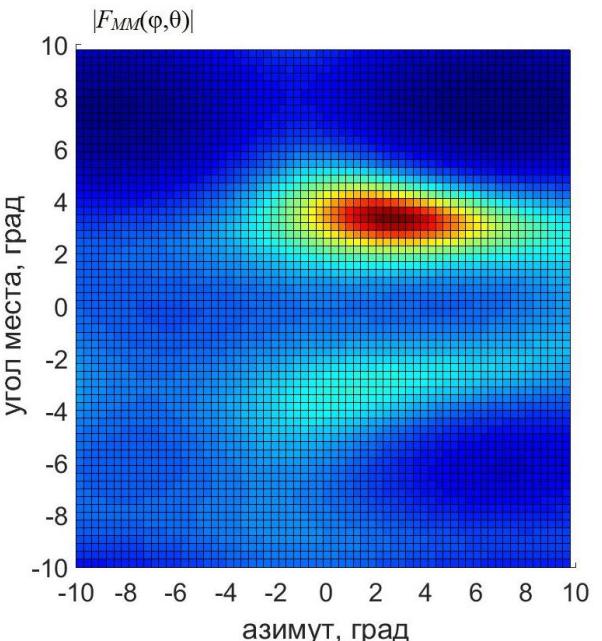
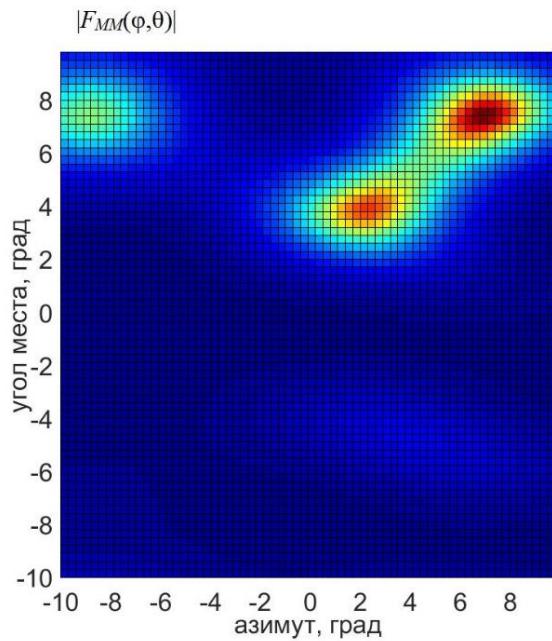


Рис. 8б. Функция неопределенности при сверхразрешении двух целей по азимуту.

направленности в азимутальной плоскости по уровню минус 3 дБ от максимума составляла 6,75 градуса (полуширина главного луча по нулям равнялась соответственно 7,61 градуса). Два источника находились на азимутах ноль градусов и минус 3,57 градуса. Для измерения корреляционной матрицы использовалось $L=4$ выборки при $N=8$ антенных каналах по горизонтали.

В Разделе 3.3 рассматривается проблема ослабления активных помех, мешающих штатному функционированию приемных телеметрических комплексов с пеленгацией целей, выполненных на основе планарных антенных решеток. Данные пассивные радары часто применяются в гражданской авиации. Постановщиками помех, как правило, выступают башни телецентров, базовые станции сотовой связи и так далее. Предлагается подход к двумерному подавлению помех (по азимуту и углу места) с последующей двумерной пеленгацией полезных источников телеметрической информации [15], [16]. На первом шаге измеряется КМ помехового фона. На втором шаге в качестве алгоритма для борьбы с помехами во входном процессе предлагается используется метод степенных векторов (2). На третьем шаге для пеленгации полезного источника применяется метод минимального многочлена (10). Проведенное численное моделирование показало, что до подавления помех предложенный метод оценки числа источников в эфире на основе аппроксимации минимального многочлена КМ входного процесса интерпретирует и помехи, и полезные сигналы, как цели (см. Рис. 9а).



После подавления помех (см. Рис. 9б) предложенный метод пеленгует и истинный источник и мнимый (отраженный от подстилающей поверхности луч) с точностью как минимум до половины ширины ДН, что достаточно для автосопровождения.

В Разделе 3.4 производится обработка и анализ результатов натурного эксперимента (см. Рис. 10а) по пеленгации источника телеметрической информации с покоящегося и движущегося (см. Рис. 10б) воздушного объектов в условиях воздействия одной покоящейся узкополосной помехи [15], [17]. Полезный принимаемый сигнал являлся фазоманипулированным сигналом. Антенная решетка представляла собой горизонтальную антеннную решетку дециметрового диапазона длин волн из восьми элементов.



Рис. 10а. Внешний вид пеленгатора во время эксперимента.

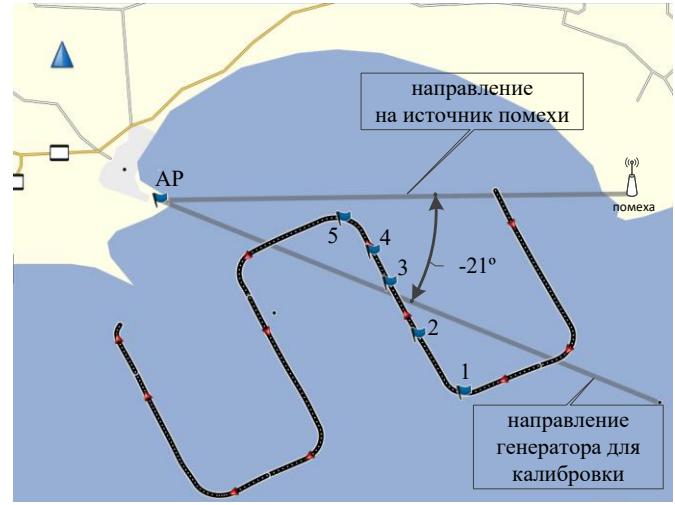


Рис. 10б. Траектория движущегося объекта и положение покоящейся помехи.

Экспериментально подтверждена точность пеленгации полезного источника с помощью предложенного метода при короткой выборке в условиях воздействия помехи, составляющая не более половины ширины ДН (см. Рис. 11а).

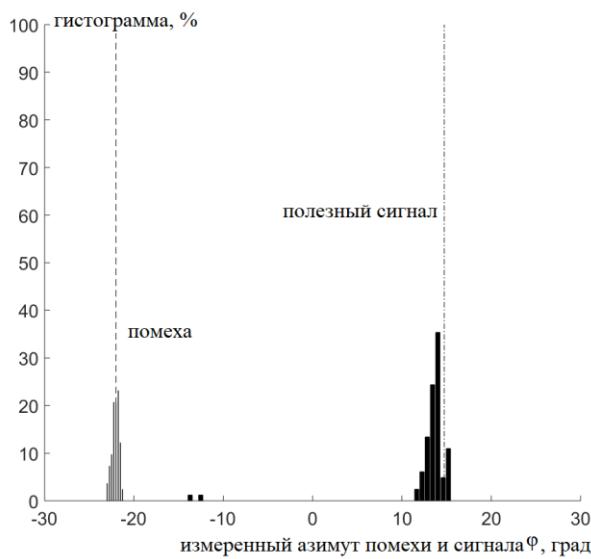


Рис. 11а. Гистограмма измеренных азимутов помехи и полезного сигнала (точка 1).

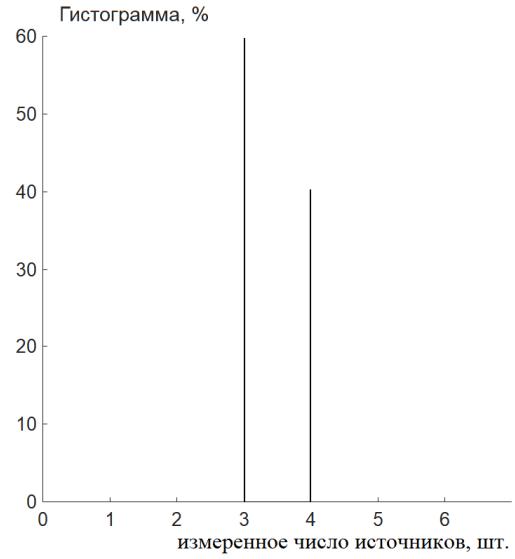


Рис. 11б. Измеренное число полезных сигналов (точка 1).

Экспериментально подтверждено (см. Рис. 11б), что при наличии подстилающей поверхности степень аппроксимации минимального многочлена КМ входного узкополосного процесса является примерно удвоенным числом источников в эфире (в независимости от помехи это или

сигнал). Результаты обработки эксперимента показали, что при наличии помех для широкого ряда значений ОСШ и угловой ориентации источников параметр регуляризации достаточно выбирать $\chi=3$. Этот результат получен впервые.

В **Четвертой главе** рассматриваются методы одномерной и двумерной пеленгации целей в МИМО радарах ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн с короткими зондирующими ЛЧМ-импульсами в квазинепрерывном режиме (FMCW). Данный класс локаторов характерен тем, что геометрия расположения передающих и приемных антенных каналов, а также кодирование на передающей стороне зондирующего сигнала индивидуальным кодом в каждом антенном канале позволяет увеличить апертуру АР на приемной стороне.

В Разделе 4.1 рассматривается задача формирования виртуальных приемных каналов в МИМО (Multiple Input Multiple Output) радаре для увеличения разрешающей способности антенны в горизонтальной плоскости [18], [19]. Впервые получены аналитические выражение принимаемого сигнала в каналах виртуальной АР в условиях доплеровского смещения частоты и коротких зондирующих ЛЧМ-импульсов при использовании на передающей стороне кода Уолша (13) и кода Фурье (14) при числе передающих антенных каналов не более четырех.

$$\mathbf{X}_W^H = [C_{rx}^{(1,1)}, C_{rx}^{(2,1)}, C_{rx}^{(3,1)}, C_{rx}^{(4,1)}, C_{rx}^{(1,3)}, C_{rx}^{(2,3)}, C_{rx}^{(3,3)}, C_{rx}^{(4,3)}, \sqrt{0.5}(C_{rx}^{(1,2)} + C_{rx}^{(1,4)}), \sqrt{0.5}(C_{rx}^{(2,2)} + C_{rx}^{(2,4)}), \sqrt{0.5}(C_{rx}^{(3,2)} + C_{rx}^{(3,4)}), \sqrt{0.5}(C_{rx}^{(4,2)} + C_{rx}^{(4,4)})], \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_F^H = [C_{rx}^{(1,1)}, C_{rx}^{(2,1)}, C_{rx}^{(3,1)}, C_{rx}^{(4,1)}, C_{rx}^{(1,3)}, C_{rx}^{(2,3)}, C_{rx}^{(3,3)}, C_{rx}^{(4,3)}, C_{rx}^{(1,2)}, C_{rx}^{(2,2)}, C_{rx}^{(3,2)}, C_{rx}^{(4,2)}], \quad (14)$$

где C_{rx}^{ij} – комплексные числа, отмеченные на Рис. 12а и Рис. 12б соответственно.

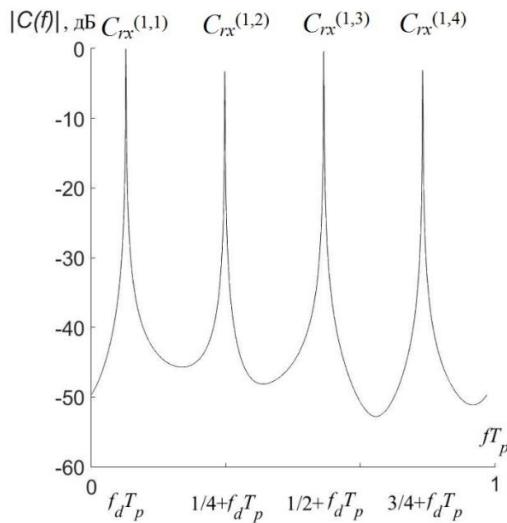


Рис. 12а. Спектр сигнала в первом виртуальном канале АР при движущейся цели при использовании кода Уолша.

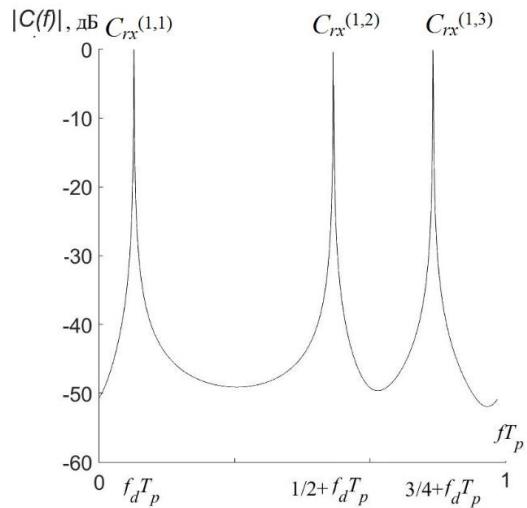


Рис. 12б. Спектр сигнала в первом виртуальном канале АР при движущейся цели при использовании кода Фурье.

Путем численного моделирования показано, что зона однозначного измерения скорости и при использовании кода Уолша (см. Рис. 13а), и при использовании кода Фурье (см. Рис. 13б) уменьшается, если не использовать декодирование на приемной стороне. Впервые экспериментально

подтверждена возможность пеленгации методом (10) по азимуту двух близко расположенных целей в случае короткой выборки входного процесса (см. Рис. 13а). Экспериментально проверена возможность правильного измерении числа целей в эфире в MIMO радаре ближнего радиуса действия (см. Рис. 13б).

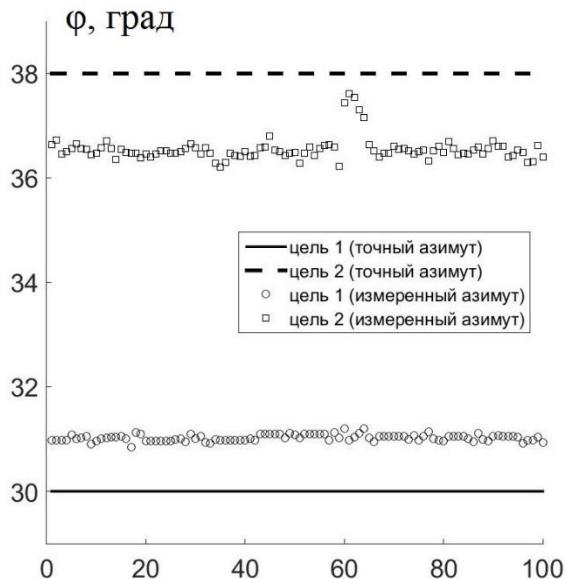


Рис. 13а. Истинный и измеренный азимуты двух близко расположенных целей.

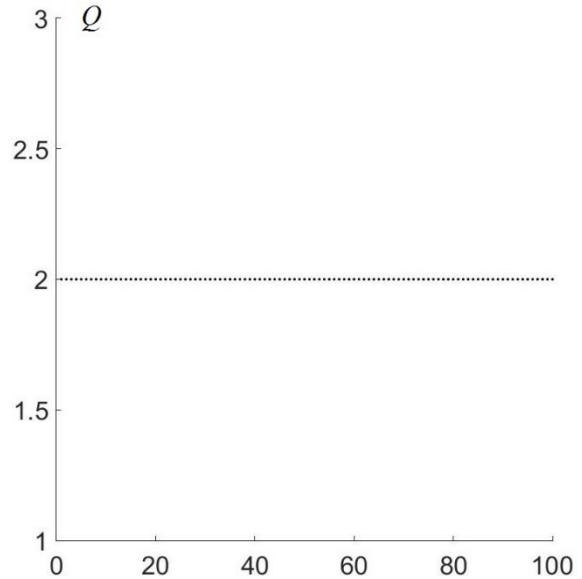


Рис. 13б. Измеренное число целей (при двух целях в эфире).

В Разделе 4.2 рассматривается проблема двумерной пеленгации по азимуту и углу места в радаре ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн. Задача является достаточно узкой. При этом радар использует MIMO технику для увеличения апертуры антенной решетки на приемной стороне [20], [21]. В двумерных MIMO радарах (см. Рис. 14а) в отличии от одномерных декодирование на приемной стороне (15) исключить практически невозможно

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}_{rx}^T \cdot \mathbf{H}, \quad (15)$$

\mathbf{H} – матрица кода. Путем численного моделирования показана возможность пеленгации методом (10) по азимуту и углу места двух близко расположенных целей при короткой выборке входного процесса (см. Рис. 14б). Предложен алгоритм декорреляции целей, который увеличивает точность измерения углов места источников.

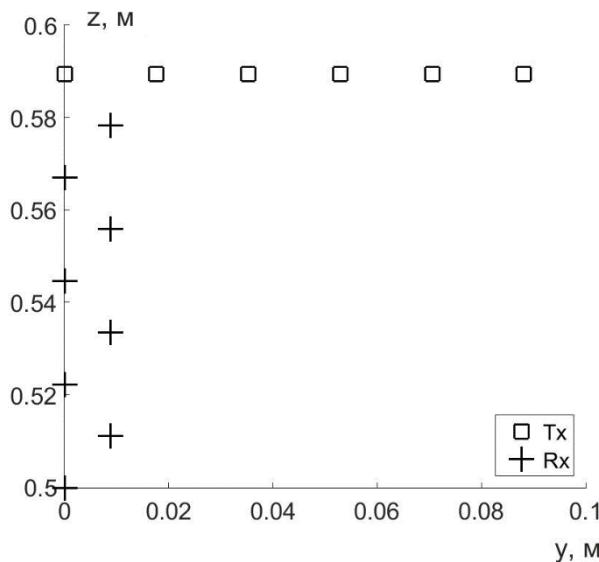


Рис. 14а. Топология двумерного MIMO радара 6х8.

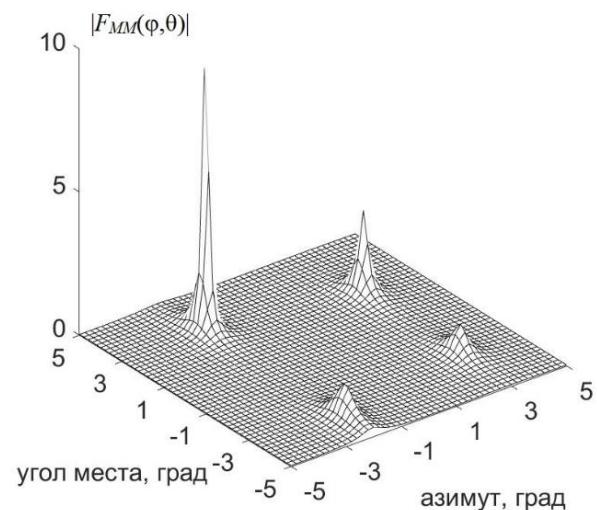


Рис. 14б. Функция неопределенности при сверхразрешении двух целей по азимуту и углу места.

В Разделе 4.3 рассматривается адаптивная АР в MIMO радаре с декодированием на приемной стороне, одновременно выполняющая подавление узкополосных пространственных помех и принимающая узкополосный полезный сигнал [22]. Аналитически получено выражение (16) для точной корреляционной матрицы тепловых шумов в MIMO радаре.

$$\mathbf{N} = \alpha \sigma_0^2 \cdot \mathbf{I}, \quad (16)$$

где α – длина кодирующего кода Уолша на передающей стороне. Предложен алгоритм формирования весового вектора АР (2) в базисе степенных векторов, обеспечивающий максимальное ОСШ при использовании регуляризации (17) измеренной КМ сигналов на выходе виртуальных приемных каналов

$$\hat{\mathbf{M}}_r = \hat{\mathbf{M}}_v + \mathbf{I} \cdot \sum_{k=1}^K |c_k|, \quad (17)$$

где $\hat{\mathbf{M}}_v$ – измеренная КМ приемной виртуальной АР MIMO радара.

В **Пятой главе** синтезируются методы одновременного обнаружения ближних и дальних целей в активном радаре ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн с многолучевой ДН и длинным во времени фазоманипулированным зондирующими сигналом при отсутствии и в условиях воздействия разнородных помех, в том числе возникающих от аналогичных радаров. Предложены методы пространственно-временной обработки сигналов, которые для ближней локации позволяют в определенном диапазоне дальностей (до 300 м) обнаруживать набор целей, одновременно обеспечивая при этом заданную вероятность ложной тревоги и пропуска цели. Показана процедура максимально-правдоподобной оценки канальной матрицы локационного канала при наличии и отсутствии помех.

В Разделе 5.1 рассматривается задача одновременного обнаружения ближних и дальних целей в радаре ближнего радиуса действия миллиметрового диапазона длин волн в условиях отсутствия помех [23].

Предлагается два подхода для решения задачи. Первый подход основывается вычитании (18) из принимаемого отраженного процесса \mathbf{X} более мощных сигналов \mathbf{S}_i во временной области для последующего детектирования менее мощных сигналов. Он подходит для небольшого числа целей (до 5 шт.)

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{X} - \mathbf{D}(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{X} = \mathbf{X} - \frac{1}{L} \left[\mathbf{D}_1(\mathbf{D}_1^T \mathbf{X}) + \mathbf{D}_2(\mathbf{D}_2^T \mathbf{X}) + \dots + \mathbf{D}_K(\mathbf{D}_K^T \mathbf{X}) \right], \quad (18)$$

где $\mathbf{D} = \{\mathbf{D}_0, \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_m\}$, причем векторы $\mathbf{D}_0, \mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_m$ содержат зондирующую сигнальную последовательность и отличаются друг от друга тем, что зондирующая последовательность сдвигается на одну позицию при смене индекса дистанции на единицу.

Второй подход базируется максимальной правдоподобной оценке (19) импульсной характеристики радиолокационного канала. Его физический смысл в том, что метод позволяет максимизировать прием отраженного сигнала от цели только в том дискрете по дальности, на котором она присутствует

$$\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{R} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{X}. \quad (19)$$

Методы обладают разной вычислительной сложностью. При этом для второго подхода значение матрицы $(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T$ может быть заранее

вычислено, что значительно уменьшает вычислительную сложность метода в целом. Данная идея впервые предложена. Численное моделирование показало, что второй подход (19) обеспечивает правильное одновременное обнаружение целей с низкой заранее заданной вероятностью ложных тревог (см. Рис. 15).

В Разделе 5.2 рассматривается проблема одновременного обнаружения ближних и дальних целей в радаре ближнего действия миллиметрового диапазона длин волн при воздействии однотипных фазоманипулированных помех. В качестве активных помех выступают

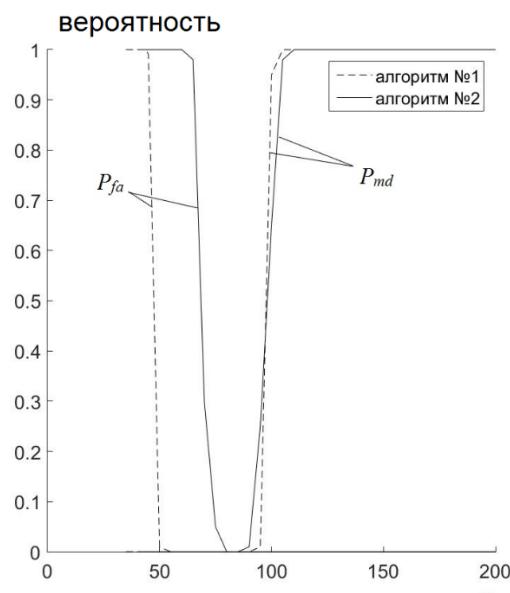


Рис. 15. Вероятность ложной тревоги и пропуска целей (8 не помеховых целей в эфире).
(8 не помеховых целей в эфире).

зондирующие сигналы аналогичных радаров [24]. Предложены два подхода для решения указанной проблемы. Первый подход сначала выполняет подавление помеховых целей по азимуту (пространственной координате) любым традиционным методом, далее с помощью (19) детектирует не помеховые цели. После этого к входному сигналу применяется матрица-проектор $\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{S}[\mathbf{S}^H \mathbf{S}]^{-1} \mathbf{S}^H$, $\mathbf{S} = \{\mathbf{S}(\phi_1), \mathbf{S}(\phi_2), \dots, \mathbf{S}(\phi_K)\}$, в результате чего по азимуту подавляются все не помеховые цели и все помеховые кроме одной рассматриваемой. Из этого сигнала формируется дальностно-скоростной

портрет (в частотной области). В нем удаляются все дискреты по дальности от отметки с максимальной амплитудой, которые и относятся к помехе. Второй подход основан на максимально правдоподобной оценке радиоканала (20) и выполняет подавление помех во временной области

$$\mathbf{H}_{est} = \mathbf{X}_2 = \left[\mathbf{D}^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{D} \right]^{-1} \mathbf{D}^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{X}, \quad (20)$$

где $\hat{\mathbf{M}}$ -измеренная КМ от рассматриваемой (индивидуально и по очереди) помеховой цели. Предложен оригинальный алгоритм измерения порога обнаружения, зависящего от настраиваемого при регулировке локатора параметра n , как помеховых, так и не помеховых целей, обладающий невысокой вычислительной сложностью. Численное моделирование показало высокую эффективность обоих предложенных подходов при правильном выборе порога обнаружения одновременного как с точки зрения вероятности обнаружения целей (см. Рис 16а), так и со стороны отсутствия пропущенных целей (см. Рис. 16б).

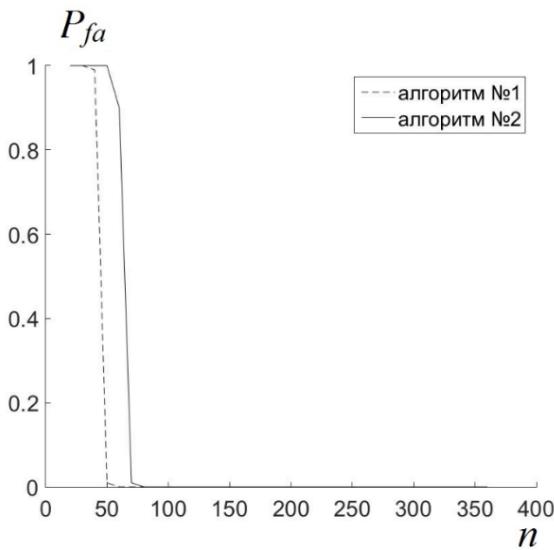


Рис. 16а. Вероятность ложной тревоги при 4-х не помеховых и 3-х помеховых целей в эфире.

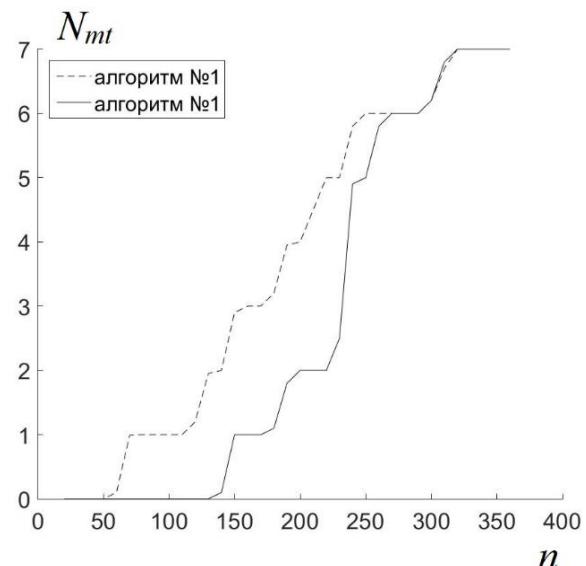


Рис. 16б. Число пропущенных целей при 4-х не помеховых и 3-х помеховых целей в эфире.

В Разделе 5.3 рассматривается задача одновременного обнаружения близких и дальних целей в радаре ближнего действия миллиметрового диапазона длин волн в условиях воздействия разнотипных помех. Считается что наиболее часто присутствующими в эфире помехами являются сигналы с ЛЧМ-модуляцией и ФМ-модуляцией. Данные типы помех возникают от аналогичных радаров различных производителей [25]. Используется оценка радиоканала (20), а впервые предложенная схема обработки сигналов представлена на Рис. 17.

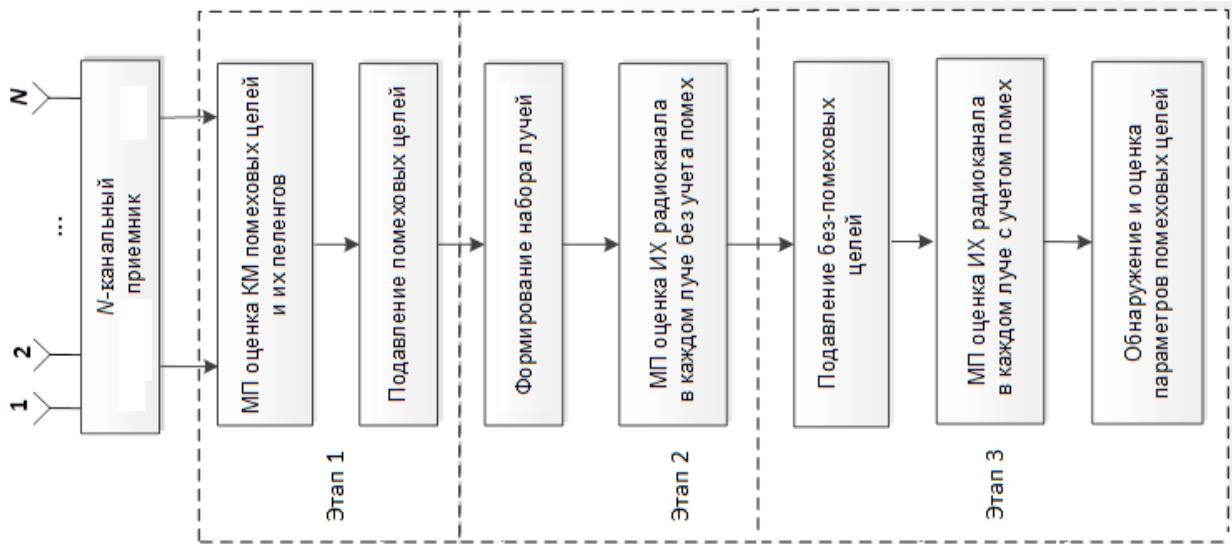


Рис. 17. Структура обработки сигналов в локаторе ближнего действия в условиях воздействия помех.

Предложен алгоритм адаптации CFAR-метода для расчета порога обнаружения (21) и (22)

$$G_k(i_0, j_0) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s |F_k(i, j)|, \quad (21)$$

$$Th_k(i_0, j_0) = n \cdot G_k(i_0, j_0) = \left[N_s \cdot (P_{fa}^{-1/N_s} - 1) \right] \cdot G_k(i_0, j_0), \quad (22)$$

где $F_k(i, j)$ - матрица дальностно-скоростного портрета в k -ом луче, N_s - число ячеек, попавших в оценочный контур, n - регулировочный параметр метода, P_{fa} - желаемая вероятность ложных тревог. Проведено численное моделирование показало универсальный характер предложенного обнаружителя в условиях воздействия разнородных помех.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации:

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод формирования регуляризованного в автоматическом режиме весового вектора адаптивной однолучевой антенной решетки для подавления узкополосных помех. Показано, что в дециметровом диапазоне длин волн при его использовании потери в отношении сигнал-шум не превышают 3 дБ при нормированной длине выборки на число антенных каналов равной 0,25.

2. Теоретически обоснован и подтвержден численным моделированием метод формирования регуляризованных весовых векторов многолучевой антенной решетки. Показано, что для обеспечения потерь в отношении сигнал-шум, не превышающих 3 дБ, достаточно использовать число выборок входного процесса только в два раза больше числа источников помех. Вычислительная сложность метода будет составлять $2N^2LJ + QN^2$ комплексных умножений, где N - число антенных каналов, L - число выборок, J - число помех, Q - число лучей.

3. Развита теория многоканальных автокомпенсаторов широкополосных стационарных и нестационарных помех при коротких выборках сигнала. Их

структура содержит многоотводную линию задержки в каждом канале кроме основного, длина которой определяется корреляционными свойствами широкополосных помех. Алгоритм имеет вычислительную сложность около $\sim N(T+1)LK$, где N – число антенных каналов, L – число выборок, T – число отводов в каждом канале линии задержки, K – число сформированных степенных векторов при разложении корреляционной матрицы. Показано, что при использовании короткой выборки $L < (NT+1)$ достигаемый коэффициент подавления помехи не более чем на 3 дБ хуже, чем теоретический.

4. Расширена теория многоканальных адаптивных антенных решеток при коротких выборках сигнала для подавления широкополосных стационарных и не стационарных помех и выделения широкополосного полезного сигнала. Их структура содержит многоотводную линию задержки в каждом канале, число отводов в которой совпадает с числом элементов полезного сигнала. Показано, что при использовании короткой выборки $L < N(T+1)$ потери в отношении сигнал-шум не превышают 3 дБ.

5. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод двумерной пеленгации подвижных объектов со сверхразрешением для приема телеметрической информации в пассивной локационной системе с автоматическим сопровождением цели. Эксперимент показал, что в дециметровом диапазоне длин волн при отношении сигнал-шум более 20 дБ вероятность правильной оценки числа источников и в азимутальной и в угломестной плоскости (с помощью метода минимального многочлена) составляет не менее 0,9. Эксперимент показал, что два источника телеметрической информации стабильно пеленгуются (разрешаются) при угловом разнесении равном 0,5 ширины главного луча диаграммы направленности и более. Эксперимент показал, что ошибка измерения азимута или угла места одного источника с помощью метода минимального многочлена при отклонении от нормали АР не превышающим ширину ДН составляет не более 0,5 градуса. Однако при приближении к зоне однозначного измерения угла ошибка может возрастать до 2 градусов.

6. Синтезирована система автоматического подавления мешающих помех, отождествления полезного источника телеметрической информации и его пеленгации в составе пассивной локационной системы. Эксперимент показал, что в дециметровом диапазоне длин волн точность пеленгации помехи составляет около 0,9 градуса, точность пеленгации полезного источника составляет около 2,6 градуса. Эксперимент показал, что достижимый коэффициент подавления помехи составляет около 26 дБ. Эксперимент показал, что вероятность правильной оценки числа помех составляет 0,8, а что вероятность правильной оценки числа полезных источников составляет около 0,9.

7. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод формирования виртуальных приемных каналов в МИМО-радаре ближнего действия при отсутствии декодера на приемной стороне применительно к задаче одномерной пеленгации. Получены аналитические выражения для

сигналов в виртуальной АР на приемной стороне в условиях доплеровского смещения частоты и коротких зондирующих ЛЧМ-импульсов. Эксперимент показал, что точность пеленгации составляет около 0,08 градуса, а вероятность правильной оценки числа целей близка к 1.

8. Теоретически решена и подтверждена численным моделированием задача двумерной пеленгации в МИМО радаре ближнего действия за счет добавления в структуру радара декодера на приемной стороне для упрощения формирования виртуальной приемной антенной решетки. Показано, что в миллиметровом диапазоне длин волн при отношении сигнал-шум более 10 дБ точность пеленгации по азимуту составляет 0,05 градуса, а по углу места – около 0,15 градуса.

9. Синтезирована система одновременного обнаружения ближних и дальних целей в РМСВ-радаре ближнего действия миллиметрового диапазона длин волн с фазоманипулированным зондирующим сигналом на фоне собственного шума. Первый режим работы основывается на проекционной технике вычитания во временной области сигналов от ближних целей для возможности обнаружения сигналов от дальних целей. Он обладает невысокой вычислительной сложностью. Второй подход базируется на технике максимально-правдоподобной оценки импульсной характеристики радиоканала. Данный подход обладает повышенной вычислительной сложностью. Предложен оригинальный алгоритм оценки порога обнаружения до 8 целей на дальности до 300 метров с невысокой вычислительной сложностью, который позволяет достичь вероятности ложных тревог и пропуска целей около 0,01.

10. Синтезирована система пространственно-временной обработки сигналов в РМСВ-радаре ближнего действия миллиметрового диапазона длин волн с фазоманипулированными зондирующими сигналами в условиях влияния активных помех. Пеленги источников помех могут совпадать (помеховая цель) или не совпадать (безпомеховая цель) с пеленгами обнаруживаемых целей. В качестве помех могут выступать как ЛЧМ-сигналы, так и ФМ-сигналы. Предложено два режима работы системы. Первый - выполняется подавление помех в частотной области, а второй основан на максимально правдоподобной оценке радиоканала и выполняет подавление помех во временной области. Порог обнаружения оценивается за счет упрощенного CFAR-метода. Результаты численного моделирования показали, что при наличии до 4 помеховых и до 3 безпомеховых целей на дальности до 300 метров удается достичь вероятности ложных тревог и пропуска целей около 0,01.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермолаев, В.Т. Регуляризация весового вектора адаптивной антенной решетки путем ограничения числа базисных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, И.С. Сорокин, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2015. – Т.58. № 3. – С. 235-243.

2. В Ермолаев, В.Т. Применение метода степенных векторов для адаптивной обработки сигналов в многолучевых антенных решетках / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, И.С. Сорокин, А.Г. Флаксман // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2016. – Т.59. № 10. – С. 948-955.
3. Ермолаев, В.Т. Экспериментальное исследование двумерного подавления помех в активном радаре на базе адаптивной антенной решетки для случая короткой выборки / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман // **Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ.** – 2022. – Т. 15. № 4. –С. 5-16.
4. Семенов В.Ю. Методы временной обработки сигналов в адаптивном трансверсальном фильтре. // **Журнал радиоэлектроники.** – 2025. – № 6. – URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.14> (дата обращения: 01.09.2025).
5. Семенов, В. Ю. Одноканальный автокомпенсатор широкополосной помехи на основе метода степенных векторов / В.Ю. Семенов, А.А. Подкопаев // **Электромагнитные волны и электронные системы.** – 2020. – Т. 25. №1-2. – С. 33-42.
6. Ермолаев, В. Т. Пространственно-временной компенсатор широкополосных помех на основе метода степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // **Известия вузов России. Радиоэлектроника.** – 2017. – №. 4. – С. 19-26.
7. Семенов, В. Ю. Подавление импульсных широкополосных помех адаптивным фильтром, основанным на методе степенных векторов / В.Ю. Семенов, А.А. Подкопаев // **Электромагнитные волны и электронные системы.** – 2020. – Т. 25. №4. – С. 46-55.
8. Ермолаев, В. Т. Подавление широкополосных помех в адаптивной антенной решетке на основе метода степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // **Электромагнитные волны и электронные системы.** – 2018. – Т. 23. №8. – С. 4-11.
9. Родионов, А.А. Локализация неподвижного источника звука с использованием некогерентного апертурного синтеза с одновременным подавлением помех / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2019. – Т. 62. № 2. – С. 126-135.
10. Родионов, А.А. Локализация движущегося источника звука с использованием некогерентного апертурного синтеза с одновременным подавлением помех / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 557-568.
11. Семенов, В. Ю. Методы пространственно-временной обработки сигналов для подавления импульсных помех в широкополосных адаптивных антенных решетках / В.Ю. Семенов // **Электромагнитные волны и электронные системы.** – 2025. – Т. 30. № 4. – С. 52-66.
12. Семенов, В.Ю. Подавление узкополосных стационарных помех в телеметрическом комплексе на основе автокомпенсатора с удаленными

- каналами / В.Ю. Семенов, А.В. Коротышев. – Текст : электронный // **Журнал радиоэлектроники.** – 2020. – №12. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec20/index.html> (дата обращения: 01.09.2025).
13. Семенов, В.Ю. Метод двумерной пеленгации в телеметрическом комплексе на основе цифровой антенной решетки / В.Ю. Семенов // **Радиотехника.** – 2025. – Т. 89. № 2. – С. 102-113.
 14. Семенов, В.Ю. Метод пространственной обработки сигналов для двумерной пеленгации со сверхразрешением в радиотелеметрическом комплексе с антенной решеткой / В.Ю. Семенов // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2024. – Т. 67. № 8. – С. 708-718.
 15. Семенов, В.Ю. Метод двумерного подавления помех в пассивной локационной системе с автоматической пеленгацией / В.Ю. Семенов // **Радиотехника.** – 2025. – Т. 89. № 3. – С. 143-156.
 16. Ивлев, Д.Н. Моделирование телеметрической системы передачи информации с учётом сложного характера движения объекта контроля / Д.Н. Ивлев, В.С. Васильев, В.Ю. Семенов, И.Я. Орлов // **Вестник Поволжского государственного технологического университета.** Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 1 (61). – С. 6-22.
 17. Родионов, А.А. Шумопеленгация акустических источников с помощью решёток микрофонов при наличии интенсивной помехи / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2023. – Т. 66. № 4. – С. 253-261.
 18. Ермолаев, В.Т. Метод формирования виртуальных приемных каналов в автомобильном ММО-радаре / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, И.В. Артюхин, О.А. Шмонин // **Радиотехника.** – 2021. – Т. 85. № 7. – С. 115-126.
 19. Ермолаев, В. Т. Применение технологии ММО в широкополосных системах беспроводной связи миллиметрового диапазона волн / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флаксман, А.Е. Рубцов, С.А. Тирапольский, В.Ю. Семенов, М.А. Соколов // **Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника.** – 2011. – Т. 54. №. 4. – С. 55-64.
 20. Артюхин, И.В. Двумерная пеленгация со сверхразрешением в автомобильном ММО радаре в условиях коррелированности целей / И.В. Артюхин, В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, О.А. Шмонин // **Электросвязь.** – 2022. – № 8. – С. 45-52.
 21. Семенов В.Ю. Пространственная обработка сигналов для измерения угловых координат в FMCW-авторадаре // **Радиотехника.** 2025. Т. 89. № 5. С. 173–185.
 22. Семенов, В. Ю. Метод степенных векторов для подавления помех в ММО-радаре / В.Ю. Семенов, А.А. Подкопаев // **Электромагнитные волны и электронные системы.** – 2019. – Т. 24. №4. – С. 5-13.
 23. Ермолаев, В.Т. Два метода обнаружения целей в автомобильном радаре на фоне собственного шума / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, И.В.

Артюхин // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2022. – Т. 65. № 12. – С. 1028-1042.

24. Ермолаев, В.Т. Методы обнаружения целей в автомобильном радаре в условиях воздействия активных помех / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман // **Радиотехника.** – 2023. – Т. 87. № 1. – С. 73-87.
25. Ермолаев, В.Т. Пространственно-временная обработка сигналов в автомобильном радаре в условиях активных помех / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман // **Известия вузов. Радиофизика.** – 2024. Т. 67, № 3. – С. 292-301.
26. **Патент № 2744824** Российской Федерации. Антенная система : № заявки 2020121842 : заявл. 26.06.2020 : опубл. 16.03.2021 / С.Н. Анохин, А.В. Баранов, Е.Ю. Бобков, В.С. Васильев, А.А. Дмитричев, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
27. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664765** Российской Федерации. Программа цифровой обработки сигналов с относительной фазовой модуляцией многоканального приемного радиотелеметрического комплекса, формирующая весовой вектор адаптивной цифровой антенной решетки для подавления активных помех : № заявки 2021664015 : заявл. 06.09.2021 : опубл. 13.09.2021 / В.С. Васильев, Е.Ю. Бобков, А.А. Дмитричев, Е.А. Маврин, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
28. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618436** Российской Федерации. Программа двумерного подавления преднамеренных и индустриальных помех на основе метода степенных векторов корреляционной матрицы антенной решетки многоканального радиотелеметрического комплекса для сигналов с относительной фазовой модуляцией : № заявки 2022617526 : заявл. 25.04.2022 : опубл. 06.05.2022 / А.В. Баранов, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
29. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614655** Российской Федерации. Программа для интерфейса пользователя телеметрического комплекса с автоматическим сопровождением цели по сигналам с двух и четырех позиционно дифференциальной фазовой модуляцией : № заявки 2021613721 : заявл. 22.03.2021 : опубл. 29.03.2021 / С.Н. Анохин, А.В. Баранов, Е.Ю. Бобков, А.А. Дмитричев, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
30. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614813** Российской Федерации. Программа для плат цифровой обработки сигналов многоканального телеметрического комплекса, принимающего информацию по сигналам с двух и четырех позиционной дифференциальной фазовой модуляцией : № заявки 2021613797 : заявл. 22.03.2021 : опубл. 30.03.2021 / С.Н. Анохин, А.В. Баранов, Е.Ю. Бобков, А.А. Дмитричев, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.

31. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ** № 2021614923 Российская Федерация. Программа для управления опорно-поворотным устройством планарной антенной решетки радиопеленгатора, принимающего сигналы с двух и четырех позиционной дифференциальной фазовой модуляцией : № заявки 2021613848 : заявл. 22.03.2021 : опубл. 31.03.2021 / С.Н. Анохин, А.В. Баранов, Е.Ю. Бобков, А.А. Дмитричев, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
32. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ** № 2021618731 Российская Федерация. Программа высокоточной фазировки радиоприемного тракта многоканального радиотелеметрического комплекса на базе цифровой ФАР по внешнему имитатору сигналов : № заявки 2021617828 : заявл. 24.05.2021 : опубл. 31.05.2021 / Е.Ю. Бобков, О.А. Истомина, Д.М. Ляшков, Е.А. Маврин, В.Ю. Семенов, М.А. Тягин. – 1 с.
33. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ** № 2021661260 Российская Федерация. Программа высокоточной экспресс-фазировки радиоприемного тракта многоканального радиотелеметрического комплекса на базе цифровой ФАР системой встроенного контроля : № заявки 2021660379 : заявл. 30.06.2021 : опубл. 07.07.2021 / С.Н. Анохин, Е.Ю. Бобков, О.А. Истомина, Д.М. Ляшков, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
34. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ** № 2022618591 Российская Федерация. Программа двумерной пеленгации со сверхразрешением на основе метода минимального многочлена корреляционной матрицы антенной решетки многоканального радиотелеметрического комплекса для сигналов с относительной фазовой модуляцией : № заявки 2022616987 : заявл. 18.04.2022 : опубл. 12.05.2022 / В.С. Васильев, А.В. Коротышев, В.Ю. Семенов, А.В. Чернов. – 1 с.
35. Ермолаев, В.Т. Применение метода степенных векторов для адаптивной обработки сигналов в многолучевых антенных решетках / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, И.С. Сорокин, А.Г. Флаксман // Труды IX всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2015. – С. 90-95.
36. Ермолаев, В.Т. Эффективность подавления широкополосной помехи в автocomпенсаторе на основе метода степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, И.С. Сорокин, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Труды IX всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2015. – С. 100-105.
37. Ермолаев, В.Т. Регуляризованный метод подавления помех в адаптивной антенной решетке / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Радиотехнологии обнаружения и нейтрализации диверсионных террористических угроз. Радиотехнологии в системах безопасности. – М.: Радиотехника, 2017 г. – С. 55-62.

38. Ермолаев, В.Т. Регуляризованный метод оценки весового вектора компенсатора помехи / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Радиотехнологии обнаружения и нейтрализации диверсионных террористических угроз. Радиотехнологии в системах безопасности. – М.: Радиотехника, 2017 г. – С. 63-72.
39. Ермолаев, В.Т. Адаптивный согласованный фильтр для подавления широкополосной помехи, основанный на методе степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман // Труды XX научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2016. – С. 328-329.
40. Ермолаев, В.Т. Применение метода степенных векторов для пространственного автокомпенсатора широкополосных помех / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Труды X всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2016. – С.108-113.
41. Ермолаев, В.Т. Эффективность подавления широкополосных помех в адаптивной антенной решетке на основе метода степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Труды X всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2016. – С. 113-118.
42. Ермолаев, В.Т. Метод подавления широкополосных помех адаптивным фильтром / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Радиотехнологии обнаружения и нейтрализации диверсионных террористических угроз. Радиотехнологии в системах безопасности. – М.: Радиотехника, 2017 г. – С. 73-81
43. Елохин, А.В. Пространственно-временной компенсатор импульсных широкополосных помех на основе метода степенных векторов / А.В. Елохин, В.Ю. Семенов, О.А. Шмонин, А.В. Ястребов // Труды XI всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2017. – С.33-37.
44. Елохин, А.В. Подавление импульсных широкополосных помех в адаптивной антенной решетке на основе метода степенных векторов / А.В. Елохин, В.Ю. Семенов, О.А. Шмонин, А.В. Ястребов // Труды XI всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2017. – С.38-42.
45. Ермолаев, В.Т. Пространственно-временной компенсатор хаотических широкополосных помех на основе метода степенных векторов / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. – М.: Радиотехника, 2018. – С. 130-143.
46. Ермолаев, В.Т. Метод подавления хаотических широкополосных помех в адаптивной антенной решетке / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, А.В. Ястребов // Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. – М.: Радиотехника, 2018. – С. 85-99.

47. Родионов, А.А. Исследование адаптивных алгоритмов шумопеленгации с помощью бортовых антенных решеток при наличии помех, вызванных работой механизмов внутри корабля-носителя / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XII всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, – С.114-118.
48. Родионов, А.А. Программная реализация адаптивной шумопеленгации методом MUSIC с помощью бортовых антенных решеток при наличии помех, вызванных работой механизмов внутри корабля-носителя / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XII всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2018. – С.119-122.
49. Родионов, А.А. Исследование возможности некогерентного апертурного синтеза для шумопеленгации покоящегося источника для разных типов траекторий приемника с одновременным подавлением внешних помех / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XII всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2018. – С.123-127.
50. Родионов, А.А. Шумопеленгация подвижного источника с помощью бортовых антенных решеток при наличии помех, вызванных работой механизмов внутри корабля-носителя / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XXIII научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2019. – С. 380-383.
51. Родионов, А.А. Некогерентный апертурный синтез движущегося источника в зависимости от типа и длины траектории носителя антенной решетки / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XXIII научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2019. – С. 387-390.
52. Родионов А.А., Семенов В. Ю., Савельев Н. В., Коновалов К. С. Родионов, А.А. Программная реализация блока адаптивной шумопеленгации гидроакустического комплекса для подвижного источника с помощью бортовых антенных решеток / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов, Н.В. Савельев, К.С. Коновалов // Труды XXIII научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2019. – С. 364-367.
53. Семенов, В.Ю. Экспериментальное исследование алгоритма пеленгации движущейся цели телеметрическим комплексом в условиях воздействия активной помехи / В.Ю. Семенов, А.А. Дмитричев, Е.Ю. Бобков, А.А. Подкопаев, А.А. Новиков. // Радиолокация. Теория и практика. – М.: Юнити-Дана, 2023. - С. 283-299.
54. Родионов, А.А. Исследование эффективности некогерентного апертурного синтеза в зависимости от типа и длины траектории носителя антенной решетки / А.А. Родионов, В.Ю. Семенов // Труды II

- всероссийской акустической конференции. – Нижний Новгород, 2017. С. 1041-1048.
55. Семенов, В.Ю. Пропускная способность широкополосной системы сотовой связи на основе антенной решетки с частотным сканированием в многолучевом канале / В.Ю. Семенов // Труды двенадцатой **международнй** конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение - DSPA'2010». – Москва, 2010. С. 265-268.
56. Семенов, В.Ю. Аналитические выражения для вероятности битовой ошибки и пропускной способности в системе мобильной связи с частотно-сканирующей антенной решеткой для пространственного канала с угловой дисперсией сигнала / В.Ю. Семенов // Труды **международной** научно-технической конференция по интеллектуальным системам AIS'10. (Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям). – Геленджик-Дивноморское, 2010. С. 318-324.
57. Семенов, В.Ю. Применение метода степенных векторов для подавления помех в MIMO радаре / В.Ю. Семенов, А.А. Подкопаев // Труды XII **всероссийской** научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова, РАН, 2018. – С.24-28.
58. Семенов, В.Ю. Метод степенных векторов для подавления помех в MIMO радаре / В.Ю. Семенов, А.А. Подкопаев // Труды XXV научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2021. – С. 224-227.
59. Пальгуев, Д.А. Матричный метод обработки массивов динамически изменяющихся данных / Д.А. Пальгуев, В.Ю. Семенов // Труды XXIV научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород: ННГУ, 2021. – С. 213-217.
60. Семенов В.Ю. Пространственно-временная обработка сигналов в автомобильном радаре в условиях воздействия разнотипных активных помех // Труды **Всероссийской** конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-ИТ 2025)». – Москва, 2025. С. 105–109.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

ГЛАВА 1. Пространственная обработка сигналов узкополосного подавителя помех на базе многолучевой адаптивной антенной решетки радиолокационной станции импульсного типа

- 1.1. Метод оценки числа действующих помех и их подавления в однолучевой антенной решетке
- 1.2. Обработка и результаты натурного эксперимента по двумерному (по азимуту и углу места) подавлению узкополосных помех в прямоугольной антенной решетке дециметрового диапазона длин волн

- 1.3. Метод пространственного подавления помех в многолучевой антенной решетке с малой вычислительной сложностью
- 1.4. Выводы по первой главе

ГЛАВА 2. Пространственно-временная обработка сигналов широкополосного подавителя помех на базе адаптивной антенной решетки радиолокационной станции импульсного типа или пассивной локационной системы

- 2.1 Метод временной обработки в одноканальном автокомпенсаторе широкополосной помехи на основе многоотводной линии задержки
- 2.2 Пространственно-временной многоканальный автокомпенсатор широкополосных помех
- 2.3 Метод временной обработки в одноканальном адаптивном фильтре для подавления широкополосной помехи с выделением полезного сигнала
- 2.4 Пространственно-временная многоканальная адаптивная антенная решетка для подавления широкополосных помех и приема полезного сигнала
- 2.5 Метод подавления импульсных широкополосных помех в пространственно-временном автокомпенсаторе
- 2.6 Метод подавления импульсных широкополосных помех в пространственно-временной адаптивной антенной решетке для приема полезного сигнала
- 2.7 Концепция построения подавителя стационарной помехи в пассивной локационной системе метрового диапазона длин волн на основе автокомпенсатора с многоотводной линией задержки
- 2.8 Выводы по второй главе

ГЛАВА 3. Пространственная обработка сигналов двумерного пеленгатора на базе адаптивной антенной решетки в пассивной локационной системе с автоматическим сопровождением целей в условиях воздействия узкополосных помех

- 3.1 Метод двумерной пеленгации при отсутствии помех
- 3.2 Обработка и результаты натурного эксперимента по двумерной пеленгации со сверхразрешением в дециметровом диапазоне длин волн на базе прямоугольной антенной решетки
- 3.3 Структура и алгоритм функционирования двумерного подавителя активных помех
- 3.4 Обработка и результаты натурного эксперимента в дециметровом диапазоне длин волн по подавлению помех в азимутальной плоскости с одновременной пеленгацией покоящегося или движущегося воздушного объекта
- 3.5 Выводы по третьей главе

ГЛАВА 4. Пространственная обработка сигналов двумерного пеленгатора на базе виртуальной антенной решетки в МИМО радаре квазинепрерывного типа ближнего радиуса действия

- 4.1 Метод формирования виртуальных приемных каналов в МИМО-радаре

- 4.2 Метод двумерной пеленгации со сверхразрешением в MIMO –радаре с большим числом передающих каналов в условиях коррелированности целей
- 4.3 Подавление помех в одномерном MIMO-радаре на основе метода степенных векторов
- 4.4 Выводы по четвертой главе

ГЛАВА 5. Пространственно-временная обработка сигналов обнаружителя целей на базе адаптивной антенной решетки радара ближнего действия в условиях помех

- 5.1 Методы одновременного обнаружения ближних и дальних целей в радаре с фазоманипулированном зондирующем сигналом в условиях отсутствия помех
- 5.2 Методы одновременного обнаружения ближних и дальних целей в условиях воздействия однотипных помех
- 5.3 Алгоритм адаптации CFAR-обнаружителя целей в условиях одновременного воздействия ФМ и ЛЧМ помех

- 5.4 Выводы по пятой главе

Заключение

Список литературы

Список сокращений

Перечень сокращений

Приложение 1 Патенты и Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

Приложение 2 Протоколы испытаний

Приложение 3 Акты