

На правах рукописи



Артюхин Игорь Владимирович

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ АВТОМОБИЛЬ-
НЫХ МИМО РАДАРОВ

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

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

Научный руководитель:	Флакسمан Александр Григорьевич доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Кашин Александр Васильевич доктор технических наук, научный руководитель филиала РФЯЦ- ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седак- ова» Родионов Александр Алексеевич кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИПФ РАН
Ведущая организация	Федеральное государственное бюд- жетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт- Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)"

Защита состоится «19» марта 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1503>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

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



Клюев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время происходит активное внедрение системы безопасности и системы помощи водителю (Advanced Driver Assistance Systems – ADAS) в область интеллектуальных транспортных систем и беспилотных автомобилей. В ADAS систему входят различные устройства, такие как лидары, видеокамеры, радары. Радары и продвинутые системы безопасности на их основе – ключевые технологии для снижения числа аварий на дорогах, объединяющие адаптивный круиз-контроль, функциональность «Stop and Go», обнаружение в пределах «мертвых зон» и др.

Наиболее распространенными являются автомобильные радары миллиметрового диапазона длин волн (76–81 ГГц), использующие линейные частотно-модулированные (ЛЧМ) импульсы в качестве зондирующих сигналов – так называемые FMCW (Frequency-Modulated Continuous-Wave) радары.

Современные радары используют многоэлементные антенные решетки (АР), как на передатчике, так и на приемнике. Антенные решетки позволяют повысить точность измерения углового положения объекта, его пространственное разрешение и уменьшить влияние различных типов помех.

Увеличение числа автомобилей оснащенных радаром ведёт к усложнению сигнальной обстановки на дороге. Вследствие этого возникают взаимные помеховые сигналы, которые могут значительно ухудшать эффективность радаров по определению положения целей и их скоростей. Поэтому, актуальной является задача, связанная с разработкой методов подавления помех.

Подавление помех можно рассматривать как с позиции подавления «на радаре», так и с позиции уменьшения влияния помех на основе стратегического планирования частотно-временных ресурсов радаров при помощи системы связи/обмена данными между автомобилями и дорожной инфраструктурой. Методы подавления помех «на радаре» можно формально сгруппировать по четырем группам в зависимости от области их применения: пространственные, временные, частотные и на основе кодового разделения сигналов и могут использоваться как по отдельности, так и в различных комбинациях.

Одной из особенностей поведения помехи в применении к автомобильным радарам является ситуация, когда цель является ис-

точником помехи (имеет собственный радар), т.е. цель и помеха находятся на одном азимуте. В этом случае формирование «нулей» в диаграмме направленности (ДН) АР в направлении помехи ослабит не только помеху, но и полезный сигнал (отраженный от цели), что может привести к неправильному принятию решения системой ADAS. Поэтому разработка методов подавления помех для такого случая сигнально-помеховой обстановки является актуальной задачей.

Для выполнения существующих требований системы ADAS современные автомобили оснащаются не одним, а несколькими радарами, объединенных в единую систему для получения лучших характеристик в задачах обнаружения, позиционирования, распознавания целей по сравнению с одиночным радаром. При реализации распределенной системы радаров возникает задача разработки новых методов пространственной обработки сигналов, учитывающие общую геометрию системы и способы объединения сигналов.

Одной из актуальных задач является разработка методов с малой вычислительной сложностью для оценки углов прихода сигналов в системе распределенных автомобильных радаров в случае короткой пространственно-временной выборки входного процесса.

Следует отметить, что на практике при обработке сигналов в автомобильных радарах, оценка углов прихода обычно осуществляется только по одной последовательности ЛЧМ-импульсов, которая дает одну пространственную выборку («snapshot») в приемной АР. Таким образом, в рассматриваемой задаче число выборок меньше числа элементов АР (так называемая короткая выборка), что приводит к сложности использования классических сверхразрешающих методов, разработанных для одиночного радара и связанных с обращением плохо обусловленной корреляционной матрицы такого короткого входного процесса, таких, например, как MUSIC или метод Кейпона.

Можно выделить два основных подхода к объединению информации с разных радаров: когерентная и некогерентная обработка сигналов. Когерентная обработка основана на построении совместной виртуальной АР нескольких радаров в бистатистическом режиме, при этом требуется синхронизация сигналов между радарами. Некогерентная обработка подразумевает объединение сигналов отдельных радаров, работающих в моностатическом режиме. В этом

случае сложность алгоритмов переносится с аппаратной реализации в сторону цифрового блока обработки сигналов.

Таким образом, тема диссертационной работы, посвященной разработке новых эффективных алгоритмов подавления помех в одиночных радарах и вычислительно-эффективных сверхразрешающих алгоритмов оценки углов прихода сигналов в системах распределенных автомобильных радаров для случая короткой выборки входного процесса, является актуальной.

Актуальность выбранной темы диссертации подтверждается активной работой в области применения автомобильных радаров миллиметрового диапазона длин волн ведущими производителями, большим объемом публикаций в научно-технических журналах, посвященных данным вопросам.

Цель работы

Разработка и исследование эффективности алгоритмов подавления помех для одиночного радара в сложной сигнально-помеховой обстановке и алгоритмов оценки углов прихода сигналов в распределенной системе автомобильных радаров для случая короткой выборки входного процесса.

Задачи работы

1. Разработка алгоритмов подавления помех для случая, когда цель является источником помехи (имеет собственный радар), т.е. цель и помеха находятся на одном азимуте.

2. Разработка вычислительно-эффективного алгоритма оценки углов прихода сигналов в системе распределенных некогерентных автомобильных радаров для случая короткой выборки входного процесса.

3. Обработка результатов натурных экспериментов по оценке углов прихода в системе некогерентных автомобильных радаров.

4. Разработка вычислительно-эффективного двумерного алгоритма оценки углов прихода при когерентной обработке сигналов в системе распределенных автомобильных радаров для случая короткой выборки входного процесса.

5. Проведение сравнительного анализа эффективности разработанных и известных методов.

Методология и методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории вероятностей, высшей алгебры

ры, векторного анализа и теории матриц, численное моделирование, а также натурные экспериментальные исследования.

Научная новизна

1. Предложен алгоритм подавления помех в автомобильных радарах в сложных условиях, когда автомобили являются одновременно источниками как отраженных сигналов, так и помех. В основе предложенного подхода к подавлению помех лежит комбинация адаптивного проекционного метода формирования «нулей» в ДН АР и метода вычитания помех в частотной области. Предлагаемая схема может быть использована в качестве алгоритма защиты от помех, когда цели и источники помех находятся в одном направлении (с одинаковыми азимутами). Показана высокая эффективность предложенного алгоритма подавления помех на основе численного моделирования.

2. Разработан экспериментально обоснованный вычислительно эффективный сверхразрешающий алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе некогерентных распределенных автомобильных радаров в случае короткой выборки входного процесса. Алгоритм состоит из трех последовательных шагов: сканирования, преобразование к единой системе координат и объединение сигналов, совместное оценивание углов прихода сигналов.

3. Метод оценивания углов прихода основан на применении двухканального автокомпенсатора, что дало возможность получить аналитические формулы для коэффициентов автокомпенсатора и, следовательно, исключить операцию вычисления обратной корреляционной матрицы входных сигналов. Предложенный метод по сравнению с методом Кейпона имеет выигрыш в использовании вычислительных ресурсов.

4. На основе экспериментальных данных и численного моделирования было проведено исследование эффективности разработанного алгоритма оценки углов прихода сигналов для системы распределенных некогерентных автомобильных радаров. Было показано, что предложенный алгоритм корректно распознает положение целей в рассматриваемых сценариях эксперимента. Сравнительное численное моделирование показало эффективность работы предложенного алгоритма по сравнению с характеристиками одиночного радара.

5. Разработан вычислительно-эффективный двумерный алгоритм оценки углов прихода сигналов в азимутальной и угломестной

плоскостях для распределенной системы бистатистических когерентных ММО радаров в случае короткой выборки входного процесса. Алгоритм является комбинацией двух методов: метод компенсации фаз сигналов и метод последовательной оценки углов прихода сигналов (на первом шаге - в азимутальной плоскости, на втором - в вертикальной). Последовательный метод оценки углов прихода обеспечивает выигрыш в использовании вычислительных ресурсов по сравнению с полным двумерным методом Кейпона.

6. Проведенное сравнительное численное моделирование на основе метода Монте-Карло показало, что предложенная схема когерентной обработки сигналов распределенных радаров приводит к улучшению целевых метрик (вероятности корректного определения числа целей, среднеквадратической и систематических ошибок) по сравнению с одиночным радаром.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая и практическая значимость исследований, проведенных в данной работе, обусловлена широким спектром актуальных проблем, связанных с обработкой сигналов в современных системах автомобильных ММО радаров. В 2019 – 2023 гг. диссертант являлся одним из основных исполнителей НИР между ООО «Инжиниринговый центр Университета Лобачевского» (ННГУ) и компанией Huawei Technologies Co. Ltd., являющейся производителем автомобильных радаров. Основные результаты работы, представленные в диссертации, были получены в рамках выполнения данных НИР и поэтому имеют непосредственную практическую значимость.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в настоящей диссертации, подтверждается их сравнением с результатами компьютерного моделирования и натурных экспериментов, соответствием с опубликованными ранее результатами в данной области, отсутствием противоречий результатов диссертации с известными теоретическими положениями статистической радиофизики, а также сравнением полученных теоретических результатов с результатами обработки экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм подавления помех в автомобильных радарх в сложных условиях, когда цели и источники помех находятся в од-

ном направлении (с одинаковыми азимутами). В основе предложенного подхода к подавлению помех лежит комбинация адаптивного проекционного метода формирования «нулей» в ДН АР и метода вычитания помех в частотной области.

2. Вычислительно-эффективный сверхразрешающий алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе некогерентных распределенных автомобильных радаров для случая короткой выборки входного процесса, основанный на применении двухканального автокомпенсатора и обеспечивающий выигрыш в использовании вычислительных ресурсов по сравнению с методом Кейпона.

3. Двумерный алгоритм оценки углов прихода сигналов в азимутальной и угломестной плоскостях для распределенной системы бистатистических когерентных ММО радаров для случая короткой выборки входного процесса основанный на последовательной оценке углов прихода (на первом шаге - в азимутальной плоскости, на втором - в вертикальной) и обеспечивающий выигрыш в использовании вычислительных ресурсов по сравнению с полным двумерным методом Кейпона.

Апробация результатов и публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 10 работах. Среди них 5 статей в журналах [1 – 5] из перечня K1-K2 ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; 5 работ [6 – 10], представляют собой опубликованные материалы докладов на научных конференциях, из них 4 включены в базу данных RSCI (Russian Science Citation Index) [6, 7, 9, 10], и 2 индексируются реферативными базами «WoS» и «Scopus» [7, 9].

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных мероприятиях: VI, VIII, IX, X Международные конференции «Инжиниринг & Телекоммуникации, En&T» (МФТИ, Москва, 2019, 2021, 2022, 2023 гг.); IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, Smart Workshop “Self-Driving Cars: from Infrastructure Communication to Sensing Technologies” (Sochi, Russia, 2019 г.); Intelligent Automotive Sensing Workshops (Moscow, 2022, 2023 гг), Intelligent Sensing Workshop, (St. Petersburg, 2024).

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке алгоритмов, проведении численного моделирования и обработки экспериментальных данных, обсуждении и физи-

ческой интерпретации полученных результатов. Все результаты диссертационной работы получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая 55 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приведено современное состояние методов обработки сигналов в автомобильных радарх миллиметрового диапазона длин волн с точки зрения проблемы повышения точности измерения углового положения и пространственного разрешения объектов, уменьшения влияния различных типов помех, обосновывается актуальность темы диссертации, кратко излагается содержание работы.

В **первой главе** рассмотрен алгоритм подавления помех в автомобильных радарх в сложных условиях, когда автомобили являются одновременно источниками как отраженных сигналов, так и помех. Приводятся результаты численного моделирования, показывающие эффективность предложенного алгоритма подавления помех, когда параметры полезного сигнала и помехи являются одинаковыми (ЛЧМ сигнал с одинаковой длительностью и полосой).

В разделе 1.1 рассмотрена общая схема обработки сигналов в автомобильном радаре, использующего последовательность коротких ЛЧМ-импульсов в качестве зондирующего сигнала.

В разделе 1.2 представлено описание двух методов, используемых в предложенном алгоритме подавления помех в радаре: адаптивного проекционного метода формирования «нулей» в ДН АР, и метода подавления помех в частотной области в лучах с помехами.

Адаптивный проекционный метод формирования ДН АР заключается в формировании нулей ДН в заданном направлении. Учитывая, что число источников K меньше числа приемных элементов N , формируется матрица $\mathbf{S}=(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_K)$ размерности $N \times K$, состоящая из нормированных векторов-фазоров $\mathbf{S}_i$, соответствующих направлению на i -ую помеху ($i = 1, 2, \dots, K$). Строится проекционная матрица размерности $N-K$: $\mathbf{P} = \mathbf{I} - \mathbf{S}(\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H$, где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, индекс H обозначает эрмитово сопряжение. Для подавления помехи адаптивный формирователь ДН использует век-

тор весовых коэффициентов в виде $V=P \cdot W$, где W – вектор-фазор, формирующий луч в направлении на полезный сигнал.

Метод «вычитания» помех в частотной области в лучах с помехами используется для исключения частот биения помехового сигнала из спектра на плоскости «скорость–дальность». Метод вычитания разбит на две процедуры, первая из которых заключается в идентификации частот биения помеховых сигналов, а вторая – в «вычитании» помеховых частот из спектра. Идентификация помехи происходит в режиме пассивного приема, когда собственный радар «слушает» окружающее пространство, не излучая в пространство свой зондирующий сигнал. Вычитание помехового сигнала из общего спектра осуществляется с помощью выражения $Y_r(f) = P_r \cdot X_r(f)$, где $X_r(f)$ – спектр полезного сигнала и помехи, P_r – соответствующая проекционная матрица.

Пусть имеется набор лучей (ДН) приемной антенны, перекрывающий заданный сектор обзора радара. Предположим, что в заданном секторе расположены цели (автомобили), отдельные автомобили-цели являются источником помехи (имеют собственный радар), т.е. цель и помеха находятся на одном азимуте. Таким образом, можно выделить два возможных сценария пространственного расположения целей и помех: (1) цели и помехи находятся в разных лучах; (2) цель и помеха находятся в одном луче.

Обработка сигналов рассматривается последовательно для двух сценариев. Для первого сценария формируются нули во всех лучах в направлениях всех помех с помощью проекционной техники и производится обработка сигналов в лучах, направленных на полезные сигналы (за исключением лучей, направленных на цели-помехи): на выходе каждого из этих лучей выполняется двумерное БПФ. Затем сигналы объединяются в некогерентном накопителе и поступают на CFAR-детектор (CFAR – Constant False Alarm Rate). Для второго сценария рассматриваются лучи в направлении на цели-помехи и в этих лучах формируются нули в направлениях на цели, свободные от помех. Выходные сигналы этих лучей обрабатываются с помощью дополнительного метода вычитания помехи в частотной области. Финальное число целей получаем путём объединения всех лучей с процедурой детектирования.

В разделе 1.3 дано детальное описание алгоритма подавления помех, являющейся комбинацией двух методов описанных в разделе 1.2.

Предложенная концепция состоит из следующих четырех этапов: (1) оценка параметров помехового сигнала, (2) обработка сигналов в лучах без помех, (3) обработка сигналов в лучах с помехами, (4) оценка числа целей.

В разделе 1.4 приводятся результаты численного моделирования для сценария пять автомобилей-целей, один из которых является также источником помехи и имеет наименьшую дальность. Параметры полезных сигналов и помех являются одинаковыми (ЛЧМ-сигналы с одинаковой длительностью и полосой). Приведено сравнение характеристик обнаружения системы без подавления помех и с учетом предложенной концепции. В работе рассмотрены метрики пропуск цели (ПЦ, Miss Detection – MD), и вероятность ложной тревоги.

Эффективность работы предложенной концепции представлена с помощью сравнения метрик ПЦ для разных сценариев на Рис. 1 на основе метода Монте-Карло.

Введем разности метрик ПЦ $\Delta_{MD} = MD_0 - MD_1$ и $\Delta_{MD} = MD_1 - MD_2$ между различными сценариями, где MD_0 – метрика ПЦ для сценария «сигнал-без помехи», MD_1 – сценарий «сигнал-плюс-помеха» без схемы подавления и MD_2 – сценарий «сигнал-плюс-помеха» со схемой подавления. Положительные значения Δ_{MD} соответствуют выигрышу, а отрицательные значения – проигрышу при сравнении вариантов обработки сигналов.

При появлении помехи метрика ПЦ ухудшается в 23% экспериментов (см. синие колонны на Рис. 1). В то же время, предложенная схема подавления улучшает статистику ПЦ в 21% экспериментов, ухудшение статистики ПЦ наблюдается только в 4% и статистика ПЦ не меняется для 75% экспериментов (жёлтая колонна на Рис. 1).

В разделе 1.5 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного в первой главе исследования.

Во **второй главе** рассмотрен вычислительно эффективный сверхразрешающий алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе некогерентных распределенных автомобильных радаров в

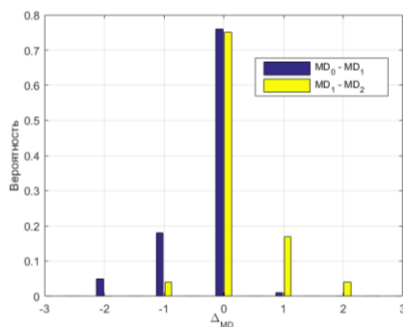


Рис. 1 – Сравнения метрик ПЦ

случае короткой выборки входного процесса. Приводятся сравнительные результаты работы предложенного алгоритма в различных сценариях расположения целей с другими известными методами и с характеристиками одиночного радара. При анализе эффективности работы алгоритмов используется как численное моделирование, так и результаты обработки экспериментальных данных.

В разделе 2.1 разработан сверхразрешающий алгоритм оценки углов прихода сигналов в азимутальной плоскости в системе некогерентных распределенных радаров. При этом основное внимание уделено случаю короткой выборки входного процесса.

Рассматриваемый алгоритм состоит из трех основных этапов:

Этап 1 (сканирование) заключается в формировании сканирующего вектора для каждого радара в локальной системе координат, связанной с центром «своей» АР в направлении на цель.

Этап 2 - преобразование векторов входных сигналов к единой системе координат. Преобразованные векторы будут иметь вид:

$$\mathbf{z}(\theta_k) = \mathbf{G}_{\theta_k} \mathbf{y}^k, \quad \mathbf{G}_{\theta_k} = \text{diag}\{\mathbf{a}(-\theta_k)\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{y}_k$ вектор принятых сигналов в АР для k -го радара, θ_k - направление прихода сигнала для k -го радара, $\text{diag}\{\mathbf{x}\}$ – диагональная матрица, содержащая элементы вектора $\mathbf{x}$ на главной диагонали.

Преобразование (1) сдвигает в ноль «центр масс» двух близких целей. Координаты исходного «центра масс» двух близких целей можно определить через решение системы уравнений двух окружностей, получаемой с учетом результатов процедуры сканирования отдельных радаров.

Преобразованные сигналы (1) отдельных радаров объединяются в общий поток данных $\mathbf{Z}=[\mathbf{z}(\theta_1), \mathbf{z}(\theta_2)]$, где матрица $\mathbf{Z}$ будет иметь размерность $[N, 2L]$, L – число временных отсчетов в отдельном радаре, N – число элементов в АР отдельного радара.

Этап 3 – определение направлений углов прихода сигнала.

Для корректной работы методов оценки углов прихода сигналов в случае коррелированных сигналов и короткой выборки входного процесса (один snapshot) необходимо применять известную процедуру пространственного сглаживания для входных данных.

Метод оценки углов прихода сигналов рассмотрен в двух вариантах: (1) метод Кейпона, модифицированный для совместной обработки сигналов, (2) вычислительно-эффективный метод, основанный на теории автокомпенсатора.

Вариант 1 – метод Кейпона. Определение направлений углов прихода сигнала осуществляется путем поиска максимумов разрешающей функции (совместного пространственного спектра):

$$\eta(\theta) = [\mathbf{a}^H(\theta) \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{a}(\theta)]^{-1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{a}(\theta)$ – сканирующий вектор, $\mathbf{M}$ – максимально правдоподобная оценка выборочной корреляционной матрицы (КМ). Оценка углов прихода сигналов определяется через решение задачи поиска экстремума функции $\eta(\theta)$ по угловой координате:

$$\hat{\theta}_m = \arg \max_{\theta} \eta(\theta) \quad (3)$$

Вариант 2 – вычислительно-эффективный метод, основанный на реализации метода Кейпона с помощью двухканального автокомпенсатора (Low-Complexity Auto-Compensator Method – LC ACM).

Схема обработки сигналов для двухканального компенсатора представлена на Рис. 2. Вычисляем значение модуля $|y(\theta)|$ сигнала y на выходе как функцию угла θ и находим максимальные значения. Максимумы функции (соответствующие им углы) будут являться углами прихода сигналов $\hat{\theta}_m$:

$$\hat{\theta}_m = \arg \max_{\theta} |y(\theta)| \quad (4)$$

Основным преимуществом использования метода оценки углов прихода сигналов на основе автокомпенсатора по сравнению с методом Кейпона является уменьшение вычислительной сложности в связи с наличием аналитических выражений для коэффициентов C_1 и C_2 , и отсутствием необходимости вычисления обратной КМ $\mathbf{M}^{-1}$ в формуле (2).

В разделе 2.2 приведена оценка вычислительных ресурсов на основе определения числа комплексных умножений. Формально, весь алгоритм разбит на три основных шага: сканирование, преобразование принятых сигналов и метод Кейпона/автокомпенсатора. Первые два шага выполняются каждым ра-

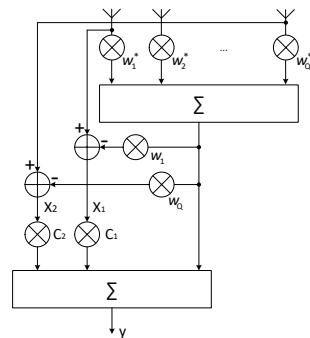


Рис. 2 – Схема двухканального компенсатора

даром по отдельности, являются одинаковыми для обоих радаров, и не учитываются при сравнении алгоритмов.

Для конкретного расчета вычислительной сложности совместной обработки (шаг 3) были выбраны следующие параметры: число антенных элементов в АР $N = 12$; размер подрешетки $Q = 8$; число временных отсчетов $L = 1$; число пространственных отсчетов $L_s = 10$; число целей $J_1 = 1$ (операция сканирования), $J_2 = 2$ (алгоритм сверхразрешения); число шагов для поиска максимумов $N_{steps1} = 12$ (операция сканирования), $N_{steps2} = 12$ (алгоритм сверхразрешения). Вычислительная сложность метода Кейпона составляет 1768 операций против 676 операций для автокомпенсатора, что соответствует выигрышу автокомпенсатора в 2.6 раз.

В разделе 2.3 приведены результаты численного моделирования на основе метода Монте-Карло для случая пространственного разрешения 2-х близких целей с угловым расстоянием 5° . Представлено сравнение эффективности предложенного алгоритма с известными методами и с характеристиками одиночного радара.

В качестве примера рассмотрена система, состоящая из двух распределенных в пространстве радаров миллиметрового диапазона длин волн, расстояние между радаром 0.9 метров. Каждый радар имеет линейную эквидистантную АР с 12 изотропными элементами, расстояние между соседними элементами 0.5λ (λ - длина волны). Рассматриваются два примера расположения целей относительно отдельных радаров: (1) симметричный случай ($\varphi=0^\circ$); (2) несимметричный случай: цели находятся в правой полуплоскости ($\varphi=7^\circ$). Здесь φ – направление на цель относительно центра системы радаров. Результаты моделирования представлены на Рис. 3.

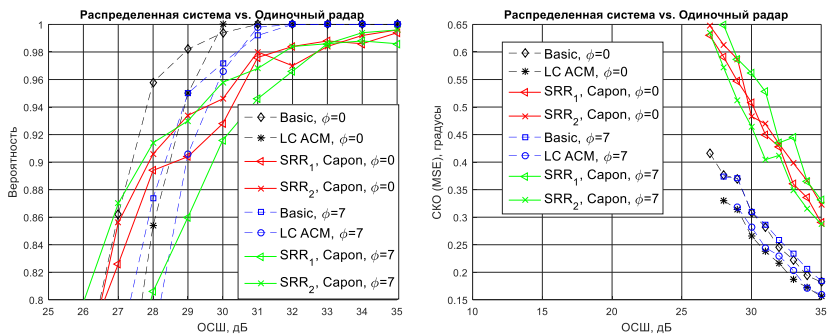


Рис. 3 – Вероятность корректного обнаружения двух целей (слева) и СКО (справа) в зависимости от ОСШ.

Основной алгоритм оценки углов прихода использующий метод Кейпона (кривые “Basic”) выигрывает в метрике вероятность корректного обнаружения двух близких целей 3 дБ по сравнению с одиночным радаром (кривые “SRR_i, Capon”) при вероятности корректного определения количества целей на уровне $p > 0.95$ (Рис. 3, слева). Из представленных результатов для второй метрики (Рис. 3, справа) видно, что среднеквадратическая ошибка (СКО) в 0.3° достигается при отношении сигнал/шум (ОСШ) 29 дБ для распределенной системы и при ОСШ 35 дБ для одиночного радара (т.е. выигрыш в ОСШ составляет 6 дБ).

В разделе 2.4 на основе измерений, полученных в ходе экспериментов, выполненных на прототипе распределенной системы автомобильных ММО радаров миллиметрового диапазона длин волн, проводится сравнение предложенного алгоритма оценки углов прихода с известными методами и с характеристиками одиночного радара. Два радара установлены на бампере автомобиля на расстоянии 1.46 метра под углом 45° .

Конфигурация АР отдельного радара 3Т4R (три приемных и четыре передающих антенны), полученная виртуальная АР является линейной, эквидистантной и состоит из 12 элементов, расстояние между соседними элементами 0.5λ .

Две цели (автомобили) находятся в общем секторе обзора двух радаров. Пример обработки экспериментальных данных представлен на Рис. 4. Синие/красные точки – решения, полученные с помощью процедуры сканирования для одиночных радаров, зеленые точки – оценки целей предложенного алгоритма для распределенной системы. В связи с ограниченным набором экспериментальных данных, для сравнения эффективности алгоритмов использовалось дополнительное численное моделирование для случая одной пары «блестящих» точек от правого и левого радаров из общего облака «блестящих» точек (что эквивалентно одиночной точечной цели в общем секторе обзора), основные результаты сведены в Табл. 1.

Рассмотрены основные метрики: СКО, систематическая ошибка (СО) и их нормированные значение (Норм.СКО, Норм.СО).

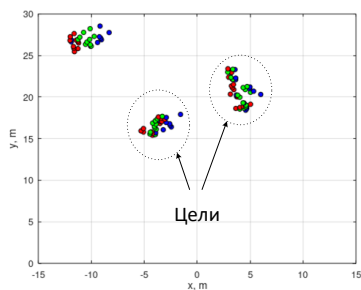


Рис. 4 – Пример обработки экспериментальных данных

Нормировка производится по отношению к метрикам алгоритма для распределенной системы радаров. LC ACM – предложенный алгоритм для распределенной системы, SRR_{1,2}, Capon – метод Кейпона для одиночного радара. Из представленных результатов видно, что распределенная система выигрывает в точности определения углов прихода сигналов примерно в 5 раз по сравнению с одиночным радаром.

В разделе 2.5 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого во второй главе исследования.

В третьей главе рассмотрен двумерный алгоритм с последовательной оценкой углов прихода сигналов в системе когерентных распределенных автомобильных ММО радаров для случая короткой выборки входного процесса. Приводятся результаты численного моделирования по разрешению двух близких целей. Представлено сравнение эффективности предложенного алгоритма с классическим двумерным методом Кейпона и с характеристиками одиночного радара.

В разделе 3.1 дано описание формирования бистатистической виртуальной АР в системе распределенных радаров с учетом геометрии системы радаров.

Рассмотрим распределенную систему, состоящую из двух когерентных ММО радаров. Предположим, что данная система имеет N_{tx} передающих и N_{rx} приемных реальных антенн. Тогда общее число антенн виртуальной АР будет равно произведению $N_{virt} = N_{tx} \times N_{rx}$. Расположение виртуальных антенн определяется как свертка координат реальных приемных и передающих антенн. Координаты m -ой виртуальной антенны будут рассчитываться из формулы:

$$\mathbf{r}^{(m)} = \mathbf{r}_{tx}^{(p)} + \mathbf{r}_{rx}^{(q)} - \mathbf{r}_0, \quad (5)$$

где $\mathbf{r}_{tx}^{(p)}$ – радиус-вектор координат p -го элемента передающей (Tx) антенны, $\mathbf{r}_{rx}^{(q)}$ – радиус-вектор координат q -го элемента приемной (Rx) антенны, $\mathbf{r}_0$ – радиус-вектор определяющий выбор системы координат, и $m = q \times p$.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов

Параметры	LC ACM	SRR ₁ , Capon	SRR ₂ , Capon
СКО	0.0711	0.4057	0.3571
Норм.СКО	1.0000	5.7067	5.0238
CO	0.0033	0.0221	0.0152
Норм.CO	1.0000	6.7627	4.6602

На Рис. 5 показан пример построения виртуальной АР для распределенной системы, состоящей из двух когерентных радаров с L-образной АР. Передающие антенны обозначены крестом, а приемные антенны – кругом. Результирующая виртуальная АР состоит из двух виртуальных моностатических решеток (выделенных синим и желтым цветами на Рис. 5, и одной виртуальной бистатической решетки, расположенной посередине. Красным цветом показаны виртуальные антенны, сформированные с помощью бистатического отклика левого радара, а зеленым цветом – правого радара. Элементы среднего столбца, выделенные оранжевым цветом в виртуальной АР, содержат бистатические измерения от правого и левого радаров, совпадающие в пространстве.

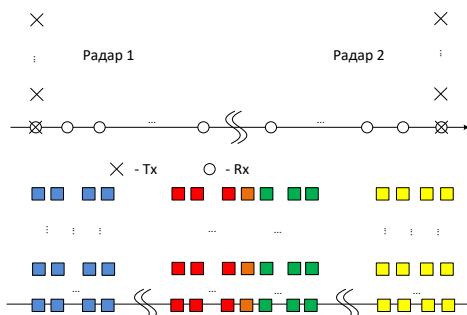


Рис. 5 – Общая геометрия распределенной системы радаров. АР, состоящая из двух радаров L-типа (сверху); виртуальная АР (снизу).

В разделе 3.2 предложен двумерный алгоритм с последовательной оценкой углов прихода сигналов в азимутальной и углометной плоскостях. Приведены оценки вычислительных ресурсов.

Алгоритм является комбинацией двух методов: метод компенсации фаз сигналов и метод последовательной оценки углов прихода сигналов (на первом шаге - в азимутальной плоскости, на втором - в вертикальной).

Метод компенсации фаз сигналов, состоит из двух этапов: (1) компенсация дополнительного набега фаз, связанного с ненулевым установочным углом отдельного радара, (2) компенсация разности фаз между двумя бистатическими сигналами.

Для компенсации дополнительного набега фаз, связанного с ненулевым установочным углом отдельного радара сделаем следующее преобразование:

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{Y}_1, \quad \mathbf{Z}_2 = \mathbf{G}_2 \cdot \mathbf{Y}_2 \quad (6)$$

$$\mathbf{G}_1 = \text{diag}\{\mathbf{s}\}, \quad \mathbf{G}_2 = \text{diag}\{\mathbf{s}^*\} \quad (7)$$

где $\mathbf{Y}_i$ ($i = 1, 2$) матрица сигналов виртуальных бистатических решеток (откликов) от левого и правого радаров, $\mathbf{s}$ - сканирующий вектор

АР в азимутальной плоскости для установленного угла α радара, $\text{diag}\{\mathbf{s}\}$ – диагональная матрица, содержащая элементы вектора $\mathbf{s}$ на главной диагонали.

Введем матрицу $\mathbf{Z}$, включающую в себя сигналы $\mathbf{Z}_1$ и $\mathbf{Z}_2$:

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2]. \quad (8)$$

Скачок в фазах между бистатистическими сигналами радаров компенсируется за счет учета разности фаз сигналов двух радаров в среднем столбце построенной виртуальной АР.

Непараметрический двумерный метод Кейпона выбран в качестве базового. Для него не требуется построения адекватной математической сигнальной модели, что упрощает оценку углов прихода. Данный метод основан на поиске максимумов двумерной разрешающей функции $\eta_C(\varphi, \theta)$:

$$\eta_C(\varphi, \theta) = [\mathbf{S}(\varphi, \theta)^H \mathbf{M}_{2D}^{-1} \mathbf{S}(\varphi, \theta)]^{-1} \quad (9)$$

где $\mathbf{M}_{2D}$ – оценка КМ входного процесса двумерной АР, $\mathbf{S}(\varphi, \theta)$ – соответствующий сканирующий вектор.

Предлагаемый в данной работе метод оценки углов прихода сигналов заключается в последовательной оценке азимута (первый шаг) и угла места (второй шаг).

Первый шаг предполагает реализацию одномерного метода Кейпона. Пусть мы имеем $m \times n$ виртуальную бистатистическую АР. Для оценки углов прихода используется один временной отсчет, который может быть представлен в математическом виде с помощью матрицы $\mathbf{A}$.

Выделим горизонтальную строку длины n из полной виртуальной АР. При этом вся матрица $\mathbf{A}$ будет использоваться для оценки КМ одномерной АР. Отдельные строки матрицы $\mathbf{A}$ можно интерпретировать как «временные отчеты» для одномерной АР. Тогда одномерную разрешающую функцию метода Кейпона можно представить в виде выражения:

$$\eta(\varphi) = [\mathbf{S}(\varphi)^H \mathbf{M}_{1D}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)]^{-1} \quad (10)$$

где матрица $\mathbf{M}_{1D}$ – соответствующая КМ, $L = m$ – число строк в виртуальной АР. В результате решения задачи максимизации функции (10), мы получим k оценок азимута: $\varphi_1, \dots, \varphi_k$.

На втором шаге реализуется двумерный метод Кейпона для оценки углов места, при этом, поиск максимумов разрешающей

функции $\eta_C(\varphi, \theta)$ осуществляется только при фиксированных значениях азимутов целей $\varphi_1, \dots, \varphi_k$, найденных на первом этапе:

$$\eta_C(\varphi, \theta)|_{\varphi=\varphi_l} = \left[\mathbf{S}(\varphi, \theta)^H \mathbf{M}_{2D}^{-1} \mathbf{S}(\varphi, \theta) \right]^{-1} \Big|_{\varphi=\varphi_l}, l = 1:k. \quad (11)$$

Таким образом, задача поиска максимумов двумерной функции $\eta_C(\varphi, \theta)$ (9) свелась к k одномерным задачам поиска экстремумов (11). Решением (11) являются оценки угла места $\theta_1, \dots, \theta_k$.

Как было отмечено выше, на практике используется только одна выборка для оценки углов прихода сигнала. В этом случае КМ $\mathbf{M}_{1D}$ и $\mathbf{M}_{2D}$ являются вырожденными. В такой ситуации применяется процедура пространственного сглаживания для входных данных с учетом геометрии системы радаров.

Оценка требуемых вычислительных ресурсов рассматриваемых алгоритмов основана на определении числа комплексных умножений и представлена для следующего случая: АР одиночного радара 6Т8R, L -типа; один отсчет («snapshot») используется для оценки углов прихода; используется процедура пространственного сглаживания.

Вычислительная сложность полного 2D метода Кейпона составляет 147240 операций комплексного умножения против 76650 операций для последовательного метода оценки углов прихода для выбранных конкретных параметров. Использование предложенного метода приводит к выигрышу в 1.9 раз в вычислительных ресурсах по сравнению с классическим методом Кейпона.

В разделе 3.3 приведены результаты численного моделирования для случая разрешения 2-х близких целей в разных сценариях их расположения. Представлено сравнение характеристик предложенного алгоритма с классическим двумерным методом Кейпона и с характеристиками одиночного радара.

Распределенная система состоит из двух когерентных радаров миллиметрового диапазона длин волн с расстоянием между ними в 1.48 метра, угол установки радаров 0 градусов (радары смотрят вперед). Антенная решетка одиночного радара имеет L -образную 6Т8R конфигурацию, представленную на Рис. 5 сверху. Период АР равен 0.575λ (горизонтальная плоскость) и 1.93λ (вертикальная плоскость).

Для иллюстрации эффективности распределенной системы когерентных радаров рассмотрим два сценария пространственного

расположения двух близких целей. Сценарий 1: две цели лежат в горизонтальной плоскости, имеют азимуты $\pm 0.5^\circ$ и одинаковый угол места 0° . Сценарий 2: две цели лежат в вертикальной плоскости, имеют одинаковый азимут 0° и углы места $\pm 1^\circ$.

Результаты численного моделирования с использованием метода Монте-Карло для предложенного алгоритма последовательной оценки азимута и угла места показали, что разрешение по азимуту и углу места (1° и 2° соответственно) достигается при ОСШ 36 дБ (сценарий 1) и 20 дБ (сценарий 2) для вероятности правильной оценки числа целей равной 0.5.

В качестве примера на Рис. 6 приведено сравнение вероятности правильной оценки числа близких целей двух представленных сценариев.

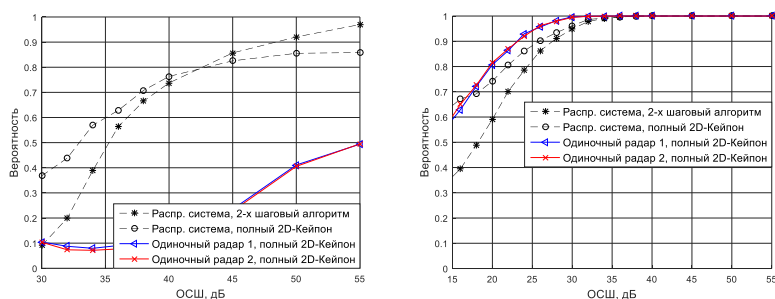


Рис. 6 – Вероятность правильной оценки числа близких целей (сценарий 1 – слева; сценарий 2 – справа)

Черная пунктирная кривая со звездочками соответствует предложенному двухэтапному алгоритму для распределенной системы радаров; черная пунктирная кривая с кружками – распределенной системе с полным 2D методом Кейпона; синяя кривая с треугольниками/красная кривая с крестиками – оценка углов прихода для одиночного радара при использовании полного 2D метод Кейпона.

Как видно из представленных графиков, одиночные радары не смогли достичь целевого уровня метрики правильной оценки количества целей $p=0.5$ для сценария 1. Отметим, что одиночный радар способен различать две близких цели в сценарии 2 за счет одинаковых апертур АР отдельного радара и распределенной системы в вертикальной плоскости.

В разделе 3.4 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого в третьей главе исследования.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны исходя из них теоретические и практические выводы.

В **приложении** приведен список используемых сокращений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен алгоритм подавления помех, состоящий из комбинации двух методов: адаптивного метода формирования ДН АР, учитывающей направления прихода помеховых сигналов, и дополнительного метода подавления помех в частотной области в лучах ДН с помехами. Показана высокая эффективность предложенной концепции подавления помех на основе численного моделирования.

2. Предложен экспериментально обоснованный вычислительно эффективный сверхразрешающий алгоритм оценки угловых направлений близкорасположенных целей для распределенной системы двух некогерентных радаров, состоящий из трех этапов: сканирования, преобразование к единой системе координат и объединение сигналов, совместная оценка углов прихода сигналов.

3. Предложен метод оценивания углов прихода для распределенной системы двух некогерентных радаров основанный на применении двухканального автокомпенсатора позволивший получить выигрыш в использовании вычислительных ресурсов по сравнению с методом Кейпона.

4. Проведенное сравнительное численное моделирование алгоритмов на основе метода Монте-Карло и обработки экспериментальных данных показали, что предложенная схема некогерентного объединения сигналов распределенных радаров приводит к улучшению основных метрик: вероятности корректного определения числа целей и среднеквадратической ошибки по сравнению с одиночным радаром.

5. Предложен двумерный алгоритм оценки углов прихода сигналов в азимутальной и угломестной плоскостях для распределенной системы бистатических когерентных ММО радаров. Алгоритм представляет из себя комбинацию двух методов: метод компенсации фаз сигналов и метод последовательной оценки углов прихода сигналов. Последовательный метод оценки углов прихода обеспечивает выигрыш в использовании вычислительных ресурсов по сравнению с полным двумерным методом Кейпона.

6. Проведенное сравнительное численное моделирование на основе метода Монте-Карло показало, что предложенная схема ко-

герентной обработки сигналов распределенных радаров приводит к улучшению целевых метрик (вероятности корректного определения числа целей, среднеквадратической и систематических ошибок) по сравнению с одиночным радаром.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермолаев, В.Т. Метод формирования виртуальных приемных каналов в автомобильном ММО-радаре / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флакман, **И.В. Артюхин**, О.А. Шмонин // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 7. – С. 115-126.
2. Артюхин, И.В. Концепция двухэтапного подавления помех в автомобильных радарх / **И.В. Артюхин** [и др.] // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2022. – №7. – С. 1-21.
3. Артюхин, И.В. Алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе распределенных некогерентных автомобильных радаров / И.В. Артюхин [и др.] // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2023. – №4. – С. 1-20.
4. Артюхин, И.В. Двумерный алгоритм с последовательной оценкой углов прихода сигналов в системе когерентных распределенных автомобильных радаров с несколькими приемными и передающими антеннами / **И.В. Артюхин** // Российский технологический журнал. – 2024. – Т. 12. – №3. – С. 65-77.
5. Артюхин, И.В. Исследование эффективности оценки углов прихода сигналов на основе экспериментальных данных и численного моделирования для системы распределенных некогерентных автомобильных радаров / **И.В. Артюхин**, А.Г. Флакман, А.Е. Рубцов // Радиотехника и электроника. – 2024. – Т. 69. – № 4. – С. 357-363.
6. Artyukhin, I.V. Development of Effective Anti-Interference Primary Signal Processing for mm-Wave Automotive Radar / **I.V. Artyukhin** [et al.] // 6th International Conference «Engineering & Telecommunication – En&T 2019». Book of Abstracts. Moscow– Dolgoprudny: MIPT, 2019. – P. 15-16.
7. Artyukhin, I.V. Development of Effective Anti-Interference Primary Signal Processing for mmWave Automotive Radar / **I.V. Artyukhin** [et al.] // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). Publisher: IEEE. Conference paper. – 2019. – P. 1-5.
8. Artyukhin, I.V. Beam-Domain Interference Mitigation System Concept in Application to Automotive Radar / **I.V. Artyukhin** [et al.] // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). Publisher: IEEE. Conference paper. – 2021. – P. 1-5.

9. Артюхин, И.В. Вычислительно-эффективный алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе некогерентных распределенных автомобильных радаров / **И.В. Артюхин** [и др.] // IX International Conference «Engineering & Telecommunication En&T - 2022», Москва, МФТИ. – 2022. – С. 5-8.

10. Artyukhin, I.V. Verification of DoA Algorithm on the Base of Experimental Data and Numerical Simulations in Automotive Distributed Non-Coherent Multi-Radars System / **I.V. Artyukhin**, A.G. Flaksman, A.E. Rubtsov // X International Conference “Engineering and Telecommunication – En&T-2023”, Moscow–Dolgoprudny : MIPT. – 2023. – P. 154-157.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Алгоритм подавления помех в автомобильных радарх

- 1.1. Обработка сигналов в ЛЧМ-радаре
- 1.2. Методы подавления помех
- 1.3. Общая концепция подавления помех
- 1.4. Результаты численного моделирования
- 1.5. Заключение по первой главе

Глава 2. Алгоритм оценки углов прихода сигналов в системе распределенных некогерентных автомобильных радаров

- 2.1. Описание алгоритма
- 2.2. Оценка вычислительных ресурсов
- 2.3. Результаты численного моделирования
- 2.4. Результаты обработки экспериментальных данных
- 2.5. Заключение по второй главе

Глава 3. Двумерный алгоритм с последовательной оценкой углов прихода сигналов в системе когерентных распределенных автомобильных ММО радаров

- 3.1. Построение виртуальной антенной решетки для распределенной системы когерентных радаров
- 3.2. Описание используемых методов
- 3.3. Результаты численного моделирования
- 3.4. Заключение по третьей главе

Заключение

Список используемых сокращений

Список используемой литературы