

ОТЗЫВ

оппонента доктора физико-математических наук, доцента РАЗИНЬКОВА Сергея Николаевича на диссертацию ФЕДОРОВА Сергея Михайловича «Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация Федорова С.М. «Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры» выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет». Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Пастернак Ю.Г.

Для подготовки отзыва оппоненту представлены:

- диссертация, основное содержание которой изложено на 307 страницах со 172 рисунками и 9 таблицами; список использованной литературы содержит 345 наименований;

- автореферат диссертации объемом до 2 печатных листов.

Актуальность темы диссертационного исследования. Потребности достижения и поддержания устойчивого информационного обмена между абонентами информационно-телекоммуникационных сетей при широкомасштабном охвате территорий определяют необходимость совершенствования технологий, направленных на улучшение помехозащищенности аппаратуры. Непреднамеренные и организованные помехи радиочастотного спектра способны нарушать устойчивость информационных процессов, приводить к блокировке приемных устройств, возникновению значительных вероятностей проявления ошибок первого и второго рода при обработке информации, создающих предпосылки для нарушения ее целостности, полноты и конфиденциальности.

Для борьбы с помехами в радиоэлектронных средствах эффективно применяются многолучевые антенны с реконфигурируемой структурой на базе физических и виртуальных антенных элементов. Использование таких устройств, с одной стороны, позволяет выполнять режекцию мешающих излучений за счет создания секторных провалов в диаграммах направленности в направлениях на источники, с другой стороны, обеспечивает усиление сигналов для превышения их энергии над уровнями помех и плотностью мощности шумов радиоприемных трактов, необходимого для реализации эффективных алгоритмов обработки.

При определении технического облика многолучевых антенн с физическими и виртуальными элементами следует учитывать ограничения для показателей пространственно-частотной избирательности приема, обусловленные массогабаритными характеристиками конструкций, искажениями фронта электромагнитного поля вследствие дифракции на приемных структурах, а также затенением каналов, сокращающим сектора сканирования пространства в плоскости азимута.

Методические основы построения многолучевых антенн, позволяющих рациональным образом распределять пространственно-частотный ресурс при совместном функционировании радиоэлектронных средств, заложены в трудах

докторов технических наук Воскресенского Д.И., Климова К.Н., Махова Д.С., Новикова А.Н. Способы миниатюризации приемных структур на основе применения изделий трансформационной оптики обоснованы в работах докторов технических наук Абраменкова В.В., Братчикова А.Н., Васильченко О.В., Дементьева А.Н. Модели и методы анализа и синтеза реконфигурируемых приемных структур с высокими коэффициентами усиления сигналов представлены в публикациях докторов технических наук Мищенко С.Е., Овчинниковой Е.В., Чеботаря И.В., доктора физико-математических наук Зиминной С.В.

Вместе с тем, в настоящее время не в полной мере решен ряд вопросов создания многолучевых антенн, к числу наиболее важных из которых относятся;

- разработка методов компенсации искажений поля на приемных структурах и оценивания комплексных амплитуд волновых процессов на фоне пространственно-коррелированных помех, обусловленных вторичным электромагнитным излучением;
- построение реконфигурируемых антенных устройств с многолучевыми диаграммами направленности на базе масштабируемых элементов для минимизации негативных эффектов экранирования секторов рабочих углов;
- изыскание способов сканирования пространства в пределах 360° в плоскости азимута с применением поляризационно-селективных зеркал;
- сокращение массогабаритных показателей аппаратуры за счет разработки линз с рационально выбранными электрофизическими параметрами и уменьшенными размерами, достигаемыми при использовании технологий трансформационной оптики.

Эффективным инструментом автоматизированного проектирования антенн является специализированное программное обеспечение Antenna Magus с функциями оперативного выбора вариантов исполнения приемопередающих структур из базы типовых конструкций, анализа их характеристик и настройки параметров при сопряжении с пакетами электродинамического моделирования. За счет формализованного представления и получения структурированной информации о показателях пространственно-частотной избирательности антенн обеспечиваются возможности сопоставления различных конструкций и нахождения конструктивно-технических решений, наиболее полно удовлетворяющих предъявляемым требованиям.

Вместе с тем, методология построения программы Antenna Magus ориентирована на выбор вариантов исполнения устройств с характеристиками, устанавливаемыми по критерию пригодности в соответствии с априори заданными функциональными свойствами и ограничениями. Такой подход практически исключает поиск оптимального облика и реализацию потенциальных функций структурного синтеза антенной системы.

Применение программ электродинамического моделирования типа CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio для исследования антенн заданной топологии связано со значительными вычислительными ресурсами. В частности, время расчета диаграмм направленности многолучевых антенных систем с вибраторными и полосковыми приемоизлучающими структурами

на персональной ЭВМ с процессором Intel Core i9-11900 с тактовой частотой 5,2 ГГц и оперативной памятью объемом 32 Гб лежит в пределах 5...6 часов. Такие затраты не позволяют осуществлять поиск альтернативных вариантов конструкций при многократном изменении параметров.

Методы расчета токов и поляризационных компонентов электромагнитного поля, не оптимизированные к типу конкретной антенной системы, требуют детальной аппроксимации их пространственно-частотных распределений для контроля ошибок при расчетах показателей пространственной избирательности передачи-приема сигналов. Расчет токов сводится к решению математически некорректных краевых задач методами нелинейного программирования с применением неформализованных процедур регуляризации и может сопровождаться накоплением вычислительных погрешностей на частотах, принадлежащих резонансной области.

Кроме того, закрытое содержание компьютерных программ затрудняет полномасштабный и всесторонний анализ факторов, регламентирующих закономерности установления характеристик антенных систем при вариациях параметров конструкций, изменении режимов согласования с фидерными трактами и различных схемах формирования диаграмм направленности.

Таким образом, тема диссертационного исследования Федорова С.М. «Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры», посвященной совершенствованию методических основ проектирования и технологий построения многолучевых антенн, является актуальной.

Степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертации на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, заключающаяся в развитии методологии проектирования многолучевых антенн с функциями компенсации помех в многоканальных радиоэлектронных средствах на основе пространственного разнесения элементов приемных конструкций в сочетании со сканированием секторов обзора главными лучами диаграмм направленности при сохранении высоких коэффициентов направленного действия.

Содержание работы, раскрывающее суть полученных автором научных результатов, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций, изложено в пяти главах.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния и тенденций совершенствования, а также выполнена оценка перспектив построения антенных систем при совместном выполнении технических требований к радиоэлектронной аппаратуре по эффективности реализации целевых функций и помехоустойчивости. В качестве принципиальных технических решений, направленных на достижение высоких отношений сигнал-помеха при сохранении предварительно установленных секторов одновременного обзора пространства, обоснованы варианты применения многолучевых антенн. Представлено техническое описание основных типов многолучевых антенных устройств, включая пассивные многолучевые антенны на основе линз, рефлекторов и диаграммообразующих схем (ДОС), активные и пассивные многолучевые фазированные ан-

тенные решетки, а также цифровые антенны. Исследованы возможности их применения в интересах реализации базовых методов пеленгования и разрешения источников радиоизлучения для удержания в главных лучах диаграмм направленности антенн при поддержании устойчивости информационного обмена по радиоканалам.

Во второй главе диссертации представлены методы формирования виртуальных антенных решеток по оценкам поляризационных компонентов электрического поля антенны на основе метода вспомогательных источников с квазирешениями методами Левенберга-Марквардта и сопряженных градиентов. Исследованы закономерности повышения точности пеленгования источников радиоизлучения при искажениях амплитудно-фазового распределения поля антенной системы, расположенной на мобильном носителе, вследствие дифракции на корпусе. Показана перспективность использования методов формирования виртуальных антенных решеток для снижения боковых лепестков диаграммы направленности антенной системы, включающей в себя, помимо физических элементов, виртуальные элементы, найденные на основе вычисленных значений напряженности электрического поля в дополнительных точках пространства.

В третьей главе диссертации представлены методы определения угловых координат источников радиоизлучения на основе обработки составляющих магнитного поля, рассчитываемых по отсчетам поляризационных компонентов электрического поля. Обоснована конструкция и по результатам электродинамического моделирования найдены параметры векторной антенны вибраторного типа для реализации указанных методов. Исследованы показатели улучшения точности пеленгования объектов при размещении аппаратуры на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах типа квадрокоптера.

В четвертой главе диссертации разработан и исследован управляемый метаматериал на основе электромагнитных кристаллов, в узлах кристаллической решетки которых размещались коммутирующие элементы. По результатам расчета S-параметров структуры найдены частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости метаматериала, обеспечивающие его киральные свойства. Разработаны волноводный фазовращатель отражательного типа на основе метаматериала с функциями управления фазой сигнала при изменении положения отражающей поверхности и реконфигурируемая рефлекторная антенна в форме прямоугольного параллелепипеда из ячеек управляемого метаматериала для изменения углового положения диаграммы направленности в целях адаптации к текущей радиоэлектронной обстановке.

В пятой главе диссертации исследованы конструкции антенн для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры. Представлены варианты конструкций многолучевых антенн с ДОС для формирования диаграмм направленности в круговом секторе в плоскости азимута, выполненными на основе:

- двухуровневой плоской диэлектрической цилиндрической линзы;
- линзы из метаматериала в форме многослойной печатной платы;
- двухуровневых линз, применяемых совместно с несимметричным ТЕМ-

рупором, антенными элементами типа несимметричной антенны Вивальди и поляризационно-селективным зеркалом.

На базе однопроводной линии передачи, возбуждающей систему излучателей, построена антенна с тороидальной и веерной диаграммами направленности.

Результаты электродинамического анализа антенн верифицированы данными экспериментальных исследований, выполненных в безэховой камере. Оценены показатели помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры в системах подвижной радиосвязи при размещении антенн с тороидальными и веерными диаграммами направленности на беспилотных летательных аппаратах самолетного типа малой и средней дальности.

К числу наиболее значимых научных результатов, полученных автором на основании выполненных исследований и использованных для формулировки положений, выдвигаемых для публичной защиты, относятся:

- метод формирования виртуальных антенных решеток для определения угловых координат источников радиоизлучения в условиях дифракционных искажений электромагнитного поля на антенной системе и несущей конструкции;
- метод пеленгования источников радиоизлучения по измерениям поляризационных компонентов электрического поля с применением векторной антенны и расчете составляющих магнитного поля, в меньшей степени подверженных искажениям пространственной структуры вследствие дифракции в радиоканале;
- метод проектирования управляемого метаматериала на основе электромагнитного кристалла с коммутационными элементами для реконфигурируемых отражательных антенн и фазовращателей;
- методики проектирования ДОС для многолучевых антенн с полноазимутальным сканированием пространства.

Указанные результаты и тематика диссертации Федорова С.М. в целом соответствуют направлениям исследований, определенным паспортом специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии:

- по пункту 2 (в части исследования характеристик антенн для их оптимизации и модернизации, что позволяет создавать высокоэффективную технологию);
- по пункту 3 (в части исследования и разработки новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами);
- по пункту 9 (в части разработки методов оптимизации антенных систем широкого применения).

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов теории волновых процессов, антенн, электродинамики и вычислительных методов, а также статистической обработки радиоизмерений и теории эксперимента.

Достоверность и новизна научных результатов, выводов и рекомендаций. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- применением теоретически обоснованных и прошедших апробацию методов исследования, сертифицированных средств для проведения вычислительных и натурных экспериментов;
- корректным выбором ограничений, допущений и исходных данных из практики разработки антенных систем и изыскания технических решений по повышению помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается ясной физической трактовкой выявленных эффектов, их соответствием общим физическим закономерностям, совпадением результатов теоретических исследований с данными, полученными в ходе экспериментов и натурных испытаний макетов антенн. Частные результаты исследования, использованные для выполнения контрольных расчетов по разработанным методам, согласуются с результатами, полученными альтернативными методами и содержащимися в работах других авторов.

Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось на основе фундаментальных положений электродинамики и теории антенн. Экспериментальные данные получены с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров антенных решеток, сертифицированных измерительных устройств и программных средств обработки измерительной информации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии анализа и синтеза антенных решеток, а также совершенствовании методов повышения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры за счет рационального выбора показателей пространственно-частотной избирательности при приеме сигналов и режекции помех в условиях сканирования пространства в круговом секторе углов в плоскости азимута.

Практическая значимость работы состоит в разработке предложений по проектированию и обосновании конструктивно-технических решений в интересах построения многолучевых антенн системы для повышения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Предложенные автором решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными результатами в области проектирования многолучевых антенн и обеспечения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Основные результаты диссертации прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных форумах по тематике исследования и в полной мере опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

Представленные в диссертации методы и методики построения многолучевых антенн обеспечивают высокую точность определения показателей эффективности передачи-приема сигналов, что, в свою очередь, позволяет снизить ресурсные и временные затраты на изготовление, экспериментальные исследования и настройку опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры.

Практическая значимость результатов, полученных автором, подтверждается по их реализации в организациях оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации:

- при обосновании конструктивно-технических решений по построению многолучевых антенн;
- при разработке технологий повышения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры за счет улучшения пространственно-частотной избирательности передачи-приема волновых процессов.

Замечания и недостатки диссертационной работы. К числу основных замечаний и недостатков работы, на наш взгляд, относятся следующие.

1. В диссертации при обосновании актуальности темы исследования не приведены количественные оценки несоответствия реализованных в настоящее время показателей помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры требуемым значениям; при доказательстве факта достижения цели работы не оценена степень соответствия полученных результатов установленному уровню.

2. Степень разработанности темы исследования определена очень схематично. Автор ограничился перечислением фамилий ведущих мировых ученых, деятельность которых связана с проектированием многолучевых антенн, не раскрывая суть достижений и проблемных вопросов.

3. Имеет место неполное соответствие между формулировками задач исследования, научных результатов и авторскими оценками их научной новизны. При этом не представляется целесообразным определять вопросы «анализа современного состояния и тенденций развития теории, техники и технологии производства многолучевых антенн и методов определения направления на источники радиоизлучения» в качестве самостоятельной задачи исследования, поскольку ее решение не может привести к получению нового научного результата. Формулировки научной новизны результатов исследования желательно дополнить описанием оригинальных методических приемов, отражающих суть развития ранее известных подходов к синтезу многолучевых антенных систем.

4. При представлении методов и методик синтеза антенн соискатель не приводит математические формулировки критериев, использование которых позволяет повысить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры. В диссертации представлены конструкции, принципы построения и базовые технологии изготовления проектируемых антенных систем без указания в явном виде последовательность действий для получения требуемых показателей пространственно-частотной избирательности.

5. Представление результатов исследования было бы более наглядным при включении в диссертацию и автореферат таблиц, где сопоставлены характеристики многолучевых антенн, созданных на основе авторских решений и применяемых в настоящее время в образцах радиоэлектронной аппаратуры.

Вместе с тем, указанные недостатки, непосредственно не охватывающие положения, выдвигаемые для публичной защиты, и не связанные с достижением цели исследования, существенно не снижают качества выполненной работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. На основе анализа диссертации Федорова С.М. «Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры» сделаны следующие выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема развития методологии проектирования многолучевых антенн с функциями компенсации помех в многоканальных радиоэлектронных средствах на основе пространственного разнесения элементов приемных конструкций в сочетании со сканированием секторов обзора главными лучами диаграмм направленности при сохранении высоких коэффициентов направленного действия. Решение данной научной проблемы имеет важное значение для исследования характеристик и совершенствования методов и технологий создания приемно-излучающих структур, а также разработки новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами конструкций в соответствии с пунктами 2, 3 и 9 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные результаты, нашедшие практическое использование при исследовании и создании новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами, развитии методов оптимизации и исследования характеристик антенн для их модернизации и создания высокоэффективной технологии построения, свидетельствующие о личном вкладе автора в науку.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Федоров С.М., достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Согласен с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Федорова С.М. и их дальнейшей обработкой.

Оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, профессор
кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем)
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Разиньков Сергей Николаевич

«19» августа 2025 года

Подпись Разинькова С.Н. заверяю.

Старший помощник начальника строевого отдела
Военного учебно-научного центра Военно-воз
«Военно-воздушная академия имени професс
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Вороне

И. Антонов

«19» августа 2025 года

Адрес: 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а
Телефон: 8(473) 244-78-29; e-mail: vva@mil.ru