

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.286.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный технический
университет», Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 09.10.2025 № 53

О присуждении Фёдорову Сергею Михайловичу, гражданину Российской Федерации, **ученой степени доктора технических наук.**

Диссертация «Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры» **по специальности** 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии **принята к защите** 26.06.2025 (протокол заседания № 49) **диссертационным советом** 24.2.286.03, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ»), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д.84 (приказ о создании диссертационного совета от 26.01.2018 № 86/нк).

Соискатель Фёдоров Сергей Михайлович, 21 января 1986 года рождения, в 2010 году **окончил** ФГБОУ ВО «ВГТУ» по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». **Диссертацию** на тему «Сверхширокополосные линзовые антенны с коммутационным сканированием в азимутальной плоскости» **на соискание ученой степени кандидата технических наук** по специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» **защитил** в 2013 в диссертационном совете, созданном на базе ФГБОУ ВО «ВГТУ». **Работает** доцентом кафедры радиоэлектронных устройств и систем ФГБОУ ВО «ВГТУ».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» на кафедре радиоэлектронных устройств и систем.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Пастернак Юрий Геннадьевич, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский

государственный технический университет», профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем.

Официальные оппоненты:

- Бородулин Роман Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор 11 кафедры (радиосвязи), федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»;

- Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»;

- Степанов Максим Андреевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в своем положительном отзыве, подписанном Ключевым Дмитрием Сергеевичем, д.ф.м.н., профессором, заведующим кафедрой радиоэлектронных систем, и утвержденном доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе Горячкиным Олегом Валериевичем, указала, что диссертация Фёдорова Сергея Михайловича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи – улучшение помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры с помощью разработки моделей и методов проектирования многолучевых антенн, содержащих виртуальные и реальные антенные элементы. Материалы автореферата соответствуют основным положениям диссертации, правильно и достаточно полно передают её содержание и полученные результаты. Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 3, 9 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. По объёму выполненных исследований, научной и практической новизне, оформлению и практической ценности работа соответствует требованиям пунктов 9, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Фёдоров Сергей Михайлович, заслуживает

присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Соискатель имеет 323 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 111 работ, из них 46 статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 37 тезисов в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, изданы 3 монографии. В том числе 19 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Имеется 3 патента на изобретение и 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ. Общий объем публикаций по теме диссертации – 46,79 печ. листа, в числе которых 37,2 печ. листа принадлежит соискателю. В работах, опубликованных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: метод формирования виртуальной антенной решетки с радиусом, изменяющимся в зависимости от частоты; помехоустойчивый метод радиопеленгации и методика построения векторных антенн, необходимая для его реализации, заключающийся в измерении электрической напряжённости поля и ее пересчете в менее искаженную магнитную компоненту; метод проектирования управляемого метаматериала, предназначенного для построения реконфигурируемых отражательных антенн и фазовращателей; методика проектирования диаграммообразующей схемы в виде двухуровневой линзы, позволяющей реализовать полноазимутальное сканирование в многолучевых антеннах; методика проектирования металлодиэлектрической линзы с уменьшенными вертикальными размерами путем использования аппарата трансформационной оптики; методика построения полноазимутальных многолучевых антенн на основе поляризационно-селективного рефлектора; методика проектирования полноазимутальных многолучевых антенн на основе однородной диэлектрической линзы полусферической формы; методика проектирования антенны на основе однопроводной линии, формирующей тороидальную и веерную диаграммы направленности.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ашихмин, А.В. Универсальный метод оценки угловых координат источников радиоизлучения с помощью антенной решетки, расположенной вблизи произвольного рассеивателя / А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, С.М. Фёдоров // Антенны. – 2020. – № 5 (267). – С. 24-31.

2. Ашихмин, А.В. Использование "виртуальной" антенной решетки из диполей для повышения инструментальной точности радиопеленгатора

бортового базирования / А.В. Ашихмин, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, С.М. Фёдоров // Антенны. – 2020. – № 6 (268). – С. 34-40.

3. Ищенко, Е.А. Применение виртуальных магнитных диполей в антенной решетке для повышения точности пеленгации / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Труды учебных заведений связи. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 39-47.

4. Ищенко, Е.А. Применение эквивалентных схем pin-диодов и МЭМС-ключей в задачах электродинамического моделирования / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 21-33.

5. Ищенко, Е.А. Исследование ограничений, накладываемых на возможности методов формирования «виртуальных» антенных решеток, в условиях значительного искажения структуры электромагнитного поля вблизи приемной антенной решетки / Е.А. Ищенко, В.В. Негроров, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 68-78.

Публикации входящие в международные реферативные базы Web of Science и Scopus

6. Pasternak, Y.G. Virtual antenna array for minimization of DOA estimation systematic error caused by scattering of incident waves on antenna carrier body / Pasternak Y.G., Fedorov S.M., Zhuravlev D.V., Ashikhmin A.V., Rembovsky Y.A. // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 308.

7. Pasternak, Y.G. Virtual antenna array for minimization of DOA estimation systematic error caused by scattering of incident waves on antenna carrier body / Y.G. Pasternak, S.M. Fedorov, D.V. Zhuravlev, A.V. Ashikhmin, Y.A. Rembovsky // Microwave and optical technology letters. – 2020. – Vol. 9. – № 2. – P. 308.

8. Ashikhmin, A.V. Design of virtual magnetic dipole antenna array to reduce the systematic bearing error caused by wave diffraction on the antenna system and its carrier body / A.V. Ashikhmin, E.A. Ishchenko, Y.G. Pasternak, P.V. Pershin, M.A. Sivash, S.M. Fedorov // 7th All-Russian microwave conference (RMC). – 2020. – P. 111-114.

9. Pasternak, Y.G. Virtual antenna array based on magnetic elements for accuracy enhancement of DOA estimation / Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fedorov // Photonics and electromagnetics research symposium, PIERS. – 2021. – P. 1668-1676.

10. Pasternak, Y.G. Extrapolated virtual antenna array for enhancement of resolution of uniform linear array / Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, I.V. Popov, S.M. Fedorov // Photonics and electromagnetics research symposium (PIERS). – 2022. – P. 1045-1052.

Объекты интеллектуальной собственности

11. Патент № 2593910 С2 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Антенна Вивальди с печатной линзой на единой диэлектрической подложке: № 2014128331/28: заявл. 11.07.2014: опубл. 27.01.2016 / А.В. Ашихмин, С.М. Федоров, В.В. Негроров, Ю.Г. Пастернак, А.С. Авдюшин; заявитель Закрытое акционерное общество "ИРКОС". – 15 с.

12. Патент № 2757866 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 21/24. Антенная решётка на радиальном волноводе: № 2020127141: заявл. 12.08.2020: опубл. 21.10.2021 / Д.С. Алиев, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров, Е.С. Чесноков, В.И. Чугуевский; заявитель ФГКВОУ «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации. – 10 с.

13. Патент № 2795995 С2 Российская Федерация, МПК H01Q 21/20. Векторная антенна: № 2020127239: заявл. 13.08.2020: опубл. 14.02.2022 / Д.С. Алиев, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров, Е.С. Чесноков, В.И. Чугуевский; заявитель ФГКВОУ «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации. – 10 с.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 11 отзывов (все отзывы положительные), в них содержатся следующие замечания:

1. Морозов Олег Геннадьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». Замечания: 1) В описании главы 2 в автореферате отсутствуют результаты расчетов с использованием данных натурных экспериментов. Проводились ли такие эксперименты в принципе? 2) Анализ антенн на основе однопроводной линии выполнен на основе определения их характеристик в пространственно-временной области. Однако, расчет в пространственно-частотной области узкополосных антенн позволяет достичь более высокой точности при меньших вычислительных затратах.

2. Минкин Марк Абрамович, д.т.н., профессор, г.н.с. АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем». Замечания: 1) Автору не до конца удалось устранить некоторую эклектичность при изложении результатов работы. В частности, решения, относящиеся к векторным антеннам, реконфигурируемым антеннам и антеннам на основе однопроводной линии, выглядят как относительно самостоятельные задачи. 2) Методика на основе формирования виртуальной решетки (ее эффективность – отдельный вопрос) годится для квазистационарного случая

(пеленгация неподвижного или малоподвижного источника), т.к. возможности обработки в реальном времени существенно ограничены. Этот аспект следовало рассмотреть. 3) Не пояснен физический смысл эффекта увеличения точности пеленгования (а также отношения с/ш и т.п.) за счет формирования виртуальной антенной решетки. Фактически используется вектор сигналов с реальных элементов, а затем выполняются линейные преобразования. Парциальные сигналы и помехи определяются исходной апертурой. Откуда берется дополнительная информация? 4) Упомянуты возможности оперативного управления характеристиками рассеивателей из предложенного метаматериала, однако конкретные результаты исследований не приведены. 5) В автореферате упоминаются экспериментальные исследования, однако данные об образцах (макетах), методиках и результатах измерений, сопоставлении расчетных и экспериментальных характеристик в большинстве случаев не приведены.

3. Геча Владимир Яковлевич, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна»; Федотов Александр Юрьевич, д.т.н., главный конструктор антенно-фидерных устройств космических аппаратов АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна». Замечания: 1) В параграфе 2.4 подробно не описаны параметры процедуры отбрасывания искаженных сигналов с элементов антенной решетки. По какому конкретно критерию это происходило? 2) В автореферате не упоминаются результаты исследования влияния погрешностей изготовления, разработанных антенных устройств, а также влияния вариации параметров диэлектриков, на их характеристики.

4. Зольников Константин Владимирович, д.ф.-м.н., доцент, ведущий инженер-конструктор дизайн-центра проектирования ИМС АО «Научно-исследовательский институт электронной техники». Замечания: 1) В параграфах 2.1–2.5 детально исследуется эффективность метода ВАР для компенсации искажений и повышения точности пеленгации. При этом отсутствует оценка вычислительной сложности и требований к аппаратным ресурсам (вычислительным мощностям, памяти) для реализации данного метода в реальном времени. 2) В параграфе 3.1 описывается разработка векторной антенны в виде куба, а в параграфе 3.2 – в виде тетраэдра. Утверждается, что конструкция тетраэдра позволяет уменьшить число вибраторов в два раза, однако в автореферате отсутствует прямое сравнение точности пеленгации, сложности изготовления, массогабаритных показателей и полосы пропускания этих двух конструкций между собой.

5. Чернышев Сергей Леонидович, д.т.н., профессор, профессор кафедры РЛ1 «Радиоэлектронные системы и устройства», ученый секретарь ученого совета ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». Замечания: 1) Результаты диссертации подтверждают высокую степень проработки темы, однако, в ряде случаев, выводы сформулированы без достаточного сравнения с решениями, представленными в научной литературе. 2) В автореферате не приводится описание методики экспериментального измерения рабочих характеристик макета многолучевой антенны на основе полусферической линзы, что затрудняет воспроизводимость исследований.

6. Шабунин Сергей Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Замечания: 1) Во второй главе описана кольцевая антенная решетка из 18 реальных излучателей радиусом 20 мм, размещенная на поверхности мобильного телефона. При этом на максимальной рассматриваемой частоте 5 ГГц расстояние между излучателями составляет всего 0,11 длины волны. Автор утверждает, что решал электродинамическую задачу с учетом не только головы пользователя, но и его руки. Указанное место расположение антенн в большинстве случаев будет закрыто рукой и ее влияние на корректность пеленгации может быть существенно, однако это влияние, судя по автореферату, не рассмотрено. 2) Описанная в главе 3 векторная антенная система в виде тетраэдра не имеет привязанной к ней системы координат и отсутствует нумерация антенн, для которых записаны последующие выражения для расчета компонентов вектора E . Не указаны размеры ребер тетраэдра, а также разнос антенн при расчете графика на рисунке 9, что не позволяет полноценно оценить полученные результаты. Не ясно, чем обусловлена систематическая ошибка пеленгации в $+(75-50)$ градусов на рисунке 9 в указанном диапазоне частот. 3) Показанные в автореферате векторные антенны в виде тетраэдра и куба представлены в виде схематичных моделей. Не ясно, каким образом предполагается реализовать данные конструкции технически с подключением линий, устройств симметрирования и т.п. 4) Приведенные в четвертой главе результаты в большей степени можно характеризовать как перспективные идеи. За рамками автореферата остались техническая реализация управляемого метаматериала и конструкции предлагаемых устройств на его основе.

7) Тихомиров Николай Михайлович, д.т.н., с.н.с., начальник научно-технического управления АО «Концерн «Созвездие». Замечания: 1) Результаты, связанные с реализацией полноазимутального сканирования без эффекта затенения каналов представлены убедительно, но требуют более

подробного анализа чувствительности к внешним факторам. 2) При анализе экспериментальных рабочих характеристик разработанных антенных устройств целесообразно было бы провести более подробное сопоставление с теоретическими моделями.

8) Савинков Андрей Юрьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры информационных систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». Замечания: 1) Из текста автореферата неясно, из каких соображений выбралось количество элементов антенной решетки, использование 18 элементов, расположенных на расстоянии много меньше половины длины волны кажется избыточным для целей радиосвязи. 2) Соискатель не привел параметры, а также данные, которые подтвердили сходимость численных электродинамических расчетов при различных настройках пространственной сетки разбиения.

9) Сучков Виктор Борисович, д.т.н., профессор кафедры СМ-5 «Автономные информационные и управляющие системы» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». Замечания: 1) Из автореферата не ясно, насколько эффективным будет использование векторных антенн в виде тетраэдра для борьбы с искажениями поля при их размещении на беспилотном летательном аппарате в случае его облучения плоской волной с круговой или линейной поляризацией. 2) В автореферате сделан вывод о преимуществах МЭМС переключателей в качестве коммутирующих элементов управляемого метаматериала с точки зрения расширения диапазона рабочих частот. При этом автором не указано, как влияют ограничения по надежности, присущие МЭМС переключателям, на рабочие характеристики управляемого метаматериала.

10) Юханов Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств института радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет". Замечания: 1) В описании параграфов 2.1-2.4 не указано, как именно физически реализованы исследуемые круговые антенные решетки. 2) В автореферате не приведен сравнительный анализ электродинамических характеристик, разработанных многолучевых антенных систем. 3) В автореферате не указано, как при разработке упрощенной модели управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла моделировалась схема питания коммутирующих элементов. 4) На странице 8 автореферата второе положение, выносимое на защиту гласит «метод пеленгации и необходимая для его реализации конструкция векторной антенны, основанный на вычислении компонент магнитной поля с использованием измеренных пространственных отсчетов электрического поля, чем достигается существенное уменьшение негативного влияния

близлежащих рассеивателей и повышение точности оценки угловых координат ИРИ». Но если компоненты магнитного поля рассчитываются по электрическим (подверженным внешнему воздействию), то почему они менее подвержены таким влиянием? Необходимы пояснения. 5) В разделе степень достоверности не указано насколько экспериментальные данные подтверждают справедливость теоретических результатов. Все перечисленное в приведенном тексте является необходимым, но не достаточным условием достоверности (ведь только практика является критерием истины). 6) На стр. 15 на рис.4 приведены модели носителей, уменьшенные в 6.5 раза, при этом не указано использовался ли при этих исследованиях принцип моделирования (увеличена ли частота сигнала во столько же раз). 7) В автореферате не указано, как при разработке упрощенной модели управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла моделировалась схема питания коммутирующих элементов. 8) Требуется пояснения и вопросы, связанные с уточнением пеленга за счет использования фиктивных источников. Например, как используя фиктивные источники, полученные в результате измерений электрического поля (подверженного по словам автора помехам), удастся увеличить точность пеленга ИРИ. Из автореферата это трудно понять.

11) Пашинцев Владимир Петрович, д.т.н., профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Замечания: 1) Помехоустойчивость систем связи можно оценить по величине вероятности ошибки при допустимом отношении сигнал/шум на входе приемника или по величине энергетического отношения сигнал/шум на входе приемника при допустимой вероятности ошибочного приема сигналов. Однако в работе отсутствуют оценки повышения помехоустойчивости приема по вероятностному или энергетическому критерию за счет применения разработанных МЛА. 2) В 5 главе были разработаны и исследованы конструкции антенн, предназначенных для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. При этом отсутствуют результаты анализа улучшения помехоустойчивости радиосистем за счет применения МЛА по сравнению с применением известных МЛА. 3) По результатам представленной докторской диссертации получено всего 3 патента РФ на изобретения, тогда как в 5 главе приведены результаты разработки 10 новых типов МЛА. 4) Из содержания автореферата непонятно, пользовался ли соискатель пакетами численного электродинамического моделирования и каким именно.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой компетентностью в области исследования и разработки многолучевых

антенных устройств, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, а также – их согласием.

Выбор ведущей организации обоснован ее широкой известностью своими достижениями в области проектирования многолучевых антенн и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также ее согласием; направление научно-исследовательской деятельности структурного подразделения (кафедра радиоэлектронных систем) соответствует теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: метод формирования виртуальной антенной решетки с изменяющимся в зависимости от частоты радиусом, и позволяющей уменьшить влияние близлежащих к антенне рассеивателей на структуру принимаемой электромагнитной волны; метод определения направления на источник радиоизлучения и методика построения векторной антенны, позволяющий уменьшить влияние на точность пеленгации искажений электрической напряженности принимаемой волны с помощью ее пересчета в менее искаженную магнитную напряженность; метод построения управляемого метаматериала, являющегося основой для построения реконфигурируемых антенных устройств и фазовращателей отражательного типа; методика проектирования диаграммообразующей схемы в виде двухуровневой линзы, позволяющей реализовывать многолучевые антенны с полноазимутальным сканированием без эффекта затенения каналов; методика проектирования многолучевой антенны с уменьшенными вертикальными размерами, благодаря шахматному размещению металлических элементов в многослойной структуре линзы; методика проектирования многолучевых антенн на основе поляризационно-селективного зеркала с возможностью полноазимутального сканирования; методика проектирования антенн на основе однопроводной линии, формирующие тороидальную и веерную диаграммы направленности;

предложено: применять изменяющийся радиус расположения виртуальных антенных элементов в зависимости от рабочей частоты, для улучшения эффективности метода виртуальных антенных решеток применительно к уменьшению негативного влияния помех; использовать менее искаженную магнитную напряженность поля, рассчитываемую на основе пространственных компонент электрической напряженности, измеренных с помощью векторной антенны, для определения направления на источник радиоизлучения; формировать динамически перестраиваемые отражательные структуры из управляемого метаматериала, представляющего собой электромагнитный кристалл с коммутационными элементами, размещаемыми в его узлах; применять двухуровневую линзу с

перфорированной разделяющей проводящей пластиной в качестве диаграммообразующей схемы для создания полноазимутальных многолучевых антенн без эффекта затенения каналов; размещать металлические патчи в шахматном порядке для формирования многослойной структуры металло-диэлектрической линзы с уменьшенными вертикальными размерами; размещать тонкие проводники под углом 45 градусов друг к другу на поверхности воздушного усеченного эллипсоида вращения, образуя поляризационно-селективный рефлектор; устанавливать облучатели вокруг полусферической диэлектрической линзы для создания одно- или двухполяризационной многолучевой антенны с полноазимутальным сканированием; использовать однопроводную линию передачи Губо совместно с системой переизлучателей или дифракционной решетки для создания направленных антенн;

доказана эффективность использования магнитной компоненты поля, рассчитываемой на основе измеренной электрической компоненты (измерение которой является затруднительной задачей из-за необходимости использования магнитных рамочных антенн, обладающих высокой добротностью и низким КПД) для уменьшения влияния искажений из-за близлежащих к антенне рассеивателей; доказана возможность нивелирования эффекта затенения каналов, возникающего при реализации полноазимутального сканирования в многолучевых антеннах, с помощью диаграммообразующей схемы в виде двухуровневой линзы, а также использования поляризационно-селективного рефлектора и полусферической однородной линзы с системой облучателей, размещаемых вокруг нее; эффективность использования аппроксимированных значений поля в качестве элементов виртуальной антенной решетки, с радиусом изменяющимся в зависимости от частоты, для уменьшения негативного влияния близлежащих рассеивателей на структуру принимаемой волны; возможность формирования и динамической перестройки отражающих поверхностей, аппроксимирующих геометрию рефлекторов сложной формы, путем замыкания соответствующих коммутационных элементов, размещаемых в узлах электромагнитного кристалла; эффективность использования однопроводной линии для создания антенн с веерной и тороидальной диаграммами направленности.

Все научные результаты диссертации обладают новизной.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:

доказана эффективность разработанных методов формирования виртуальной антенной решетки, а также методов и методик синтеза многолучевых антенн, основные характеристики которых позволяют обеспечить значительное улучшение помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры; эффективность использования векторных антенн в виде куба и

тетраэдра для определения направления на источник радиоизлучения с произвольной поляризации, путем измерения пространственных компонент электрической напряженности и его пересчете в пространственные компоненты магнитной напряженности с помощью второго уравнения Максвелла; эффективность формирования отражательной структуры со сложной геометрией и возможностью перестройки на основе конструкции в виде тонких проводников, образующих кристаллическую решетку с коммутационными элементами в узлах;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы основные принципы электродинамики, теория антенн и СВЧ-устройств, вычислительные методы электродинамики, численное моделирование с использованием апробированных программных средств, а также – стандартные методики измерения характеристик приземных и подземных антенн;

изложены основные критерии, подходы, методы и этапы разработанной методологии проектирования многолучевых антенн, состоящих из реальных и виртуальных антенных элементов, а также реконфигурируемых антенн, векторных антенн и антенн на основе однопроводных линий, характеристики которых позволяют значительно улучшить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры; результаты численного электродинамического моделирования антенн и данные их натурных экспериментальных исследований;

раскрыты особенности влияния параметров, формируемой виртуальной антенной решетки, на ее эффективность применительно к улучшению помехоустойчивости; особенности влияния параметров коммутационных элементов на рабочие характеристики управляемого метаматериала;

изучены факторы, оказывающие существенное влияние на взаимосвязь формируемой диаграммы направленности многолучевых антенн при заданном качестве их согласования с фидерной линией, и величины коэффициента полезного действия;

проведена модернизация существующих методов проектирования многолучевых антенн с возможностью полноазимутального сканирования, построенных на основе двухуровневой линзы, поляризационно-селективном зеркале, металлодиэлектрической линзы и полусферической диэлектрической линзы; а также методов построения векторных антенн и виртуальных антенных решеток с целью улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в виде методов и методик на предприятиях: АО НПП «Автоматизированные системы связи», АО НВП «ПРОТЕК», АО «НКТБ «Феррит», АО «Электросигнал», а также в учебный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ» для подготовки студентов по специальности 11.04.03 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (направленности «Радиоэлектронные системы передачи информации»);

использованы разработанные методы, методики и модели в ходе выполнения следующих научно-исследовательских работ: грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-57.2020.9 «Исследование и разработка опто-управляемого метаматериала для создания многофункциональных сверхширокополосных антенных систем»; грант Российского научного фонда № 19-79-10109 «Аппроксимация пространственного распределения электромагнитного поля в окрестности расположения трехмерных рассеивателей с априорно неизвестными геометрией и материальными свойствами с целью формирования дополнительных "виртуальных" каналов радиоприема»; продленный грант Российского научного фонда № 19-79-10109-П; государственное задание № FZGM-2024-0003 по созданию молодежной лаборатории «Помехоустойчивых систем связи и управления наземными и воздушными беспилотными роботизированными аппаратами»; государственное задание № FZGM-2023-0011 «Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего функциональность беспилотных летательных аппаратов малого радиуса действия»; государственное задание № FZGM-2024-0006 «Разработка и исследование принципов создания системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов с использованием аэромобильных антенных систем».

определены возможности применения разработанных методов и методик проектирования многолучевых антенн, векторных антенн, реконфигурируемых антенн, и реализованных технических решений в аппаратуре управления, связи и радиопеленгации;

создана совокупность методов и методик автоматизированного проектирования многолучевых антенн, реконфигурируемых антенн и векторных антенн, основные характеристики которых позволяют обеспечить улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры различного назначения;

представлены рекомендации по использованию полученных результатов при модернизации существующих и разработке перспективных антенных систем аппаратуры управления и связи.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: в результате выполненного численного моделирования с использованием апробированных программных средств получены конструктивные параметры, на основе которых реализованы макет исследуемой многолучевой антенны; достоверность полученных результатов подтверждается высокой степенью совпадения расчетных характеристик антенных устройств и данных их натурных экспериментальных измерений, полученных с использованием стандартных методик, сертифицированного оборудования и поверенных измерительных приборов;

теория согласуется с данными экспериментальных исследований характеристик аналогичных антенных устройств, в частных или предельных случаях, проведенных в России и за рубежом и опубликованных в работах С.Е. Банкова, Н.А. Бей, В.А. Калошина, Д.И. Воскресенского, С.Н. Шабунина, J.P. Choi, W.-Q. Wang, F.F. Manzillo, R.T. Schwarz.;

идея базируется на обобщении передового опыта разработок многолучевых антенн, векторных антенн и реконфигурируемых антенн в России и за рубежом, и применении новых подходов к их проектированию (в частности – использование двухуровневой линзы с перфорированной стенкой для реализации полноазимутального сканирования, а также управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла с целью получения возможности изменения геометрии отражательной поверхности, и адаптации диаграммы направленности и рабочей полосы антенны к текущим условиям);

использовано сравнение авторских данных и результатов, полученных ранее по рассматриваемой в диссертации тематике;

установлено качественное и количественное соответствие частных и предельных результатов диссертации с результатами, представленными в работах, посвященных многолучевым антеннам, векторным антеннам и реконфигурируемым антеннам;

использовано апробированное программное обеспечение CST Microwave Studio для анализа и синтеза многолучевых антенн, векторных антенн и реконфигурируемых антенн.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах работы над диссертацией, включая теоретические исследования, разработку методик проектирования и моделирования антенн, обработку и интерпретацию данных моделирования антенных устройств, личном участии в апробации результатов исследования, разработке макетных образцов и проведении экспериментальных исследований, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Фёдоров С.М. подробно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию значимости и новизны проведенных исследований, а также обоснованности и достоверности полученных результатов.

На заседании 09.10.2025 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной проблемы повышения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры, сопровождающееся серьезной теоретической проработкой, подтверждающей правильность предложенных решений и безусловно обладающих научной новизной, а также имеющих значение для развития теории, техники и технологии многолучевых антенн с виртуальными и реальными антенными элементами, векторных антенн и реконфигурируемых антенн, присудить Фёдорову С.М. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Макаров
Олег Юрьевич

Белецкая
Светлана Юрьевна

9 октября 2025 г.