

**Отзыв научного консультанта**  
**на диссертацию Фёдорова Сергея Михайловича**  
**«Синтез многолучевых антенных систем с физическими и**  
**виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости**  
**радиоэлектронной аппаратуры»,** представленную на соискание ученой  
степени доктора технических наук по специальности  
2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Фёдоров Сергей Михайлович, 1986 года рождения, в 2010 окончил «Воронежский государственный технический университет» по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

В 2013 году окончил очную аспирантуру «Воронежского государственного технического университета». В том же году успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

С 2014 года по настоящее время работает в «Воронежском государственном техническом университете» на кафедре радиоэлектронных устройств и систем. За время работы соискатель принимал участие в ряде научно-исследовательских и научно-образовательных работ в качестве руководителя:

– 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»;

и исполнителя:

– 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»;

– заказ Фонда инфраструктурных и образовательных программ

(ФИОП, группа РОСНАНО) на разработку дополнительной профессиональной образовательной программы повышения квалификации в области разработки и производства интегральных микросхем памяти.

Также, был награжден следующими дипломами:

- лауреата премии правительства Воронежской области среди молодых ученых за научно-исследовательскую работу «Проектирование сверхширокополосных линзовых антенн»;

- автора проекта «Антенная решетка на радиальном волноводе для сетей связи 5G» за участие в ежегодном межвузовском конкурсе инновационных проектов «Кубок инноваций»;

- лауреата областного конкурса «Инженер года – 2018» по категории «Профессиональные инженеры»;

- лауреата всероссийского конкурса «Инженер года» по версии «Профессиональные инженеры» в номинации «Радиотехника, электроника, связь»;

- специальным дипломом оргкомитета конкурса инновационных идей «Созвездие Z» в номинации «Будь на связи - Связь и логистика» за идею «Интеграция антенных систем для спутниковой и 5G связи с солнечными панелями».

В 2019 году получил благодарственное письмо от правительства Воронежской области за добросовестный труд, высокий уровень профессиональных знаний и большой личный вклад в развитие научно-технического и промышленного потенциала Воронежской области.

В 2021 году Сергею Михайловичу было присвоено ученое звание доцента по специальности «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Является ученым секретарем диссертационного совета 24.2.286.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальностям 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» и 2.2.14 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии». Является научным руководителем 4-х аспирантов.

Актуальность темы диссертации Фёдорова Сергея Михайловича обусловлена необходимостью улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры для достижения их максимальных потенциальных рабочих характеристик, а также для разработки и реализации перспективных технологий, предоставляющих новые возможности и улучшающие существующие.

Содержание диссертации соответствует п. 2, 3, 9 паспорта специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Соискателем решены следующие научно-технические задачи:

- Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития МЛА. Рассмотрены различные виды многолучевых

антенн (МЛА). Проанализированы методы радиопеленгации, используемые в современной радиотехнической аппаратуре.

- Показано, что для повышения эффективности метода виртуальных антенных решеток (ВАР) требуется изменять радиус размещения виртуальных антенных элементов в зависимости от частоты падающей электромагнитной волны. Выяснено, что линейный закон изменения радиуса ВАР является оптимальным, так как позволяет существенно повысить точность определения направления на источник радиоизлучения (ИРИ) в широком диапазоне частот и является наиболее универсальным, не требующим задания дополнительных параметров в отличие от ступенчатых вариантов адаптации радиуса под частоту.

- Исследовано влияние значительных искажений структуры электромагнитного поля (ЭМП) в месте размещения элементов ВАР на эффективность работы метода ВАР. Показано, что замена сильно искаженных измеренных отсчетов поля на виртуальные антенные элементы, и последующее их использование вместе с неискажёнными отсчетами для формирования ВАР позволяет существенно уменьшить погрешность определения направления на ИРИ.

- Разработаны конструкции векторных антенн в виде куба и тетраэдра, способные измерить проекции вектора напряженности электрического поля, которые затем пересчитываются в пространственные компоненты напряженности магнитного поля. Показано, что использование менее искаженного магнитного поля для оценки пеленгов позволяет повысить точность определения направления на ИРИ.

- Разработан управляемый метаматериал, представляющий собой электромагнитный кристалл с коммутационными элементами в узлах, и обладающий способностью синтезировать отражающие поверхности сложной формы, что позволяет строить на его основе реконфигурируемые отражательные антенны и фазовращатели. Предложено использовать коммутационные элементы с управлением по оптоволокну, которое не искажает структуру ЭМП и не восприимчиво к радиочастотным помехам.

- Разработаны конструкции МЛА с полноазимутальным сканированием на основе двухуровневой линзы и различных антенных элементов (несимметричных вибраторов с экраном, симметричного и несимметричного ТЕМ-рупора, несимметричных антенн Вивальди). Исследован вариант реализации двухуровневой линзы с градиентом коэффициента преломления. Исследованы частотные зависимости коэффициента корреляции по огибающей, показывающие эффективность разработанных МЛА при использовании в помехоустойчивой многоканальной радиоаппаратуре. Проведен анализ помехозащищённости,

реализуемой разработанными МЛА, с помощью рассчитанных значений передне-заднего отношения (ПЗО).

- Разработано поляризационно-селективное зеркало в форме усеченного параболоида вращения (или сферы), внутри которого размещалась система облучателей, формирующие множество лучей в полноазимутальном секторе. Подтверждена возможность реализации двухкоординатного сканирования в данной конструкции. Исследована эффективность работы поляризационно-селективного зеркала с помощью рассчитанных частотных зависимостей ПЗО.

- Разработаны конструкции антенн на основе однопроводной линии с тороидальной и веерной диаграммами направленности, реализуемые с помощью размещения переизлучателей вдоль линии и дифракционной решетки за линией, соответственно.

Научной новизной обладают следующие положения диссертации:

- разработан метод формирования ВАР с изменяющимся, в зависимости от частоты радиусом, позволяющий реализовать процедуру оценки угловых координат источников радиоизлучения в условиях значительных дифракционных искажений измеряемого электромагнитного поля на антенной системе, корпусе ее мобильного или бортового носителя, подстилающей поверхности, а также – других близлежащих рассеивателей;

- разработан метод пеленгации ИРИ и конструкция векторной антенны, необходимая для его реализации, заключающийся в измерении пространственных компонент электрического поля и расчете на их основе менее искаженных компонент магнитного поля, используемых для расчета реальной части вектора Пойнтинга, который позволяет провести оценку направления падения электромагнитной волны;

- разработана методика проектирования управляемого метаматериала, являющегося базовым элементом для построения реконфигурируемых отражательных антенн и фазовращателей, и представляющего собой электромагнитный кристалл, в узлах которого размещались коммутационные элементы, используемые для формирования отражающей поверхности со сложной геометрией;

- разработана методика проектирования диаграммообразующей схемы в виде двухуровневой линзы на основе металлического листа с системой отверстий для перетекания электромагнитной энергии из нижней части в верхнюю, и являющейся основой для построения МЛА с полноазимутальным сканированием без эффекта затенения тела линзы;

- разработана методика проектирования металлодиэлектрической линзы с размерами, уменьшенными с помощью метода трансформационной оптики, и используемой для построения МЛА с полусферическим сканированием;

- разработана методика построения полноазимутальных МЛА на основе поляризационно-селективного зеркала в форме усеченного эллипсоида вращения из наклоненных тонких проволочек, внутри которого размещается система облучателей;

- разработана методика проектирования полноазимутальных МЛА на основе однородной диэлектрической линзы полусферической формы, с расположенной вокруг нее системой облучателей для работы с одной или двумя линейными ортогональными поляризациями;

- разработана методика проектирования антенны на основе однопроводной линии, используемой для возбуждения линейных излучателей, размещённых по принципу, аналогичному антенне Франклина, и для использования совместно с параллельно расположенной дифракционной решеткой с целью формирования тороидальной и веерной диаграмм направленности, соответственно.

Практическая значимость работы заключается в разработке методов формирования виртуальных антенных элементов и расчёта магнитной компоненты поля на основе измеренного векторной антенной электрического поля позволяют создавать радиоэлектронную аппаратуру с улучшенной устойчивостью к искажениям принимаемой электромагнитной волны. Разработанной конструкции управляемого метаматериала, являющейся универсальной основой для создания реконфигурируемых антенн и фазовращателей, в том числе отражательных фазированных антенных решеток. Разработанных многолучевых антеннах, позволяющих улучшить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры за счет реализации большого значения коэффициента усиления на луч, при этом сектор покрытия остается широким благодаря возможности полноазимутального или полусферического сканирования. Разработанных конструкциях антенн на основе однопроводной линий, предназначенных для использования в системах связи с целью улучшения помехоустойчивости, в которых относительное перемещение объектов ограничено из-за практики применения и, следовательно, не требуется полное покрытие.

Степень достоверности полученных в работе результатов обусловлена применением известных методов синтеза и анализа антенн, корректным использованием методов математического моделирования и вычислительных методов технической электродинамики, а также проведением экспериментальных исследований для верификации полученных расчетных результатов. Полученные результаты не противоречат фундаментальным законам физики, теории и техники антенн, электродинамики, а также ранее полученным результатам исследований других авторов. Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось с использованием фундаментальных законов электродинамики, теории и техники антенн.

Экспериментальные данные получены на научно-внедренческом предприятии «ПРОТЕК» с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров антенн.

Основные результаты диссертации опубликованы в 46 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.14, 19 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, изданы 3 монографии, получены 3 патента РФ и 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ, 37 работ опубликованы в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Все основные результаты диссертации получены соискателем лично.

Фёдоров Сергей Михайлович показал себя сложившимся научным работником, талантливым и трудолюбивым инженером, обладающим глубокими знаниями в области теории, техники и технологии производства антенн и СВЧ устройств. Отличное знание теории, современного состояния техники и технологии производства многолучевых, реконфигурируемых и векторных антенн, владение вычислительной и измерительной техникой, хорошее знание английского языка являлись факторами, способствовавшими успешному завершению научной работы и достижению ее основной цели – разработки методов повышения помехоустойчивости радиоэлектронных устройств с помощью создание многолучевых антенн, использующих в своей работе методы аппроксимации поля.

Считаю, что Фёдоров Сергей Михайлович достоин присуждения ему ученой степени доктора технических наук, а подготовленная диссертация полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ.

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры радиоэлектронных  
устройств и систем  
ФГБОУ ВО «ВГТУ»

«12» мая 2025 г.

Юрий Геннадьевич Пастернак

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84  
Служеб. тел. +7(473)207-22-20 (доб. 6090)  
E-mail: pasternakyg@mail.ru

Подпись Пастернака Ю.Г. заверяю:  
Проректор по науке и инновациям  
ФГБОУ ВО «ВГТУ», д.т.н., доцент



А.В. Башкиров