

На правах рукописи



ФЁДОРОВ Сергей Михайлович

**СИНТЕЗ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ С ФИЗИЧЕСКИМИ
И ВИРТУАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Воронеж 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет".

Научный консультант **Пастернак Юрий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Официальные оппоненты: **Бородулин Роман Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, профессор 11 кафедры (радиосвязи), ФГКВУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), ФГКВУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Степанов Максим Андреевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоприемных и радиопередающих устройств, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится «9» октября 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «14» июля 2025 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



Белецкая Светлана Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние десятилетия беспроводная связь развилась от технологии, используемой только узким кругом специалистов, до бурно развивающейся области науки и техники, имеющей широкий круг применений. Все более широкое распространение устройств с удаленным управлением, появление новых мультимедийных приложений, а также экспоненциальный рост спроса на услуги беспроводной передачи данных создают значительную нагрузку на существующие беспроводные сети. Перспективные системы связи должны будут обладать большей скоростью передачи данных, увеличенной абонентской емкостью, меньшей задержкой и лучшим качеством обслуживания для того, чтобы решить указанные проблемы. Для реализации подобных систем необходимым является разработка эффективных методов борьбы с радиочастотными помехами.

Радиочастотные помехи определяют как нежелательное воздействие электромагнитного поля (ЭМП), созданного одним или несколькими источниками, на принимаемый радиосигнал, проявляющееся в ухудшении качества приема, росте ошибок или потери информации, которая могла бы быть успешно получена при отсутствии этого нежелательного воздействия. Все радиоэлектронные устройства являются потенциально уязвимыми для радиопомех, включая такие широко используемые системы как: сотовая связь, спутниковая связь (включая системы с низкоорбитальными спутниками), радиосвязь с дистанционно управляемыми объектами, интернет вещей, беспроводные локальные сети, радиолокация, радионавигация и др. По причине наличия помех в канале связи, перечисленные радиосистемы не могут полностью реализовать свои потенциально достижимые рабочие характеристики. Например, максимально достижимая дальность беспилотного летательного аппарата (БПЛА) ограничивается уровнем отношения сигнал/шум в точке приема, а не емкостью аккумуляторной батареи. Также, скорость передачи информации в системах подвижной связи падает с увеличением уровня шума, т.к. это приводит к необходимости переключения на более медленные и помехоустойчивые модуляции, а также увеличения избыточности помехоустойчивых кодов.

Все источники радиопомех делятся на две большие группы:

- преднамеренные источники помех, создаваемые целенаправленно для ухудшения или блокирования работы радиоэлектронной аппаратуры;
- непреднамеренные источники помех, возникающие случайным образом или в результате ошибок при проектировании радиоэлектронных устройств и систем.

Примерами непреднамеренных источников помех являются: шум от USB зарядных устройств, некорректно работающие усилители сигналов, промышленные помехи, тепловой шум, вспышки на солнце. Отдельно стоит выделить внутренние помехи, возникающие из-за генерации шума самим радиоэлектронным устройством или системой, что приводит к ухудшению ее рабочих характеристик. К таким помехам относятся: помехи в соседних

пространственных и частотных каналах, замирания сигнала, интермодуляция, межсимвольные помехи, помехи в неортогональных системах множественного доступа (технология NOMA), помехи из-за разности расстояний между базовыми станциями и абонентским оборудованием в сотовых системах связи. Примерами источников преднамеренных помех являются разнообразные устройства радиоэлектронного подавления, излучающие ЭМП в определенном диапазоне частот с мощностью сопоставимой или превышающей полезный сигнал в точке приема.

Для решения задачи улучшения помехоустойчивости радиоэлектронных систем в данной работе предлагается использовать многолучевые антенны (МЛА) и реконфигурируемые антенные устройства на основе физических и виртуальных антенных элементов, обладающих высоким коэффициентом усиления, что позволяет добиться лучшего отношения сигнал/шум. Отметим, что для значительной части радиоэлектронной аппаратуры важным является широкоугольное или полноазимутальное покрытие. Последние сложно реализовать в МЛА из-за эффекта затенения каналов, поэтому разработка и исследование МЛА с полноазимутальным сканированием является актуальной задачей.

Для удержания приемопередатчика в луче сканирующей антенны, необходимо знать направление на него. Эффективным средством решения данной задачи является применение алгоритмов радиопеленгации, чья точность также сильно подвержена влиянию помех и искажений. Перспективным направлением борьбы с этим влиянием представляется использование виртуальных антенных решеток (ВАР), представляющих собой отсчеты поля на некотором удалении от антенны, полученные путем вычислений на основе измеренных значений поля. А также, использование магнитной компоненты поля, которая зачастую менее искажена чем электрическая, может уменьшить влияние искажения структуры поля на точность оценки направления на источник радиоизлучения (ИРИ). Для реализации такого подхода, необходима разработка векторных антенны для измерения всех пространственных компонент ЭМП.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие теории и техники, а также методологии проектирования МЛА многие отечественные и зарубежные ученые: В.П. Акимов, С.Е. Банков, Н.А. Бей, Н.И. Бобков, А.М. Бобрешов, Д.И. Воскресенский, Е.Г. Зелкин, В.А. Калошин, К.Н. Климов, Б.А. Левитан, В.В. Муравьев, Ю.Б. Нечаев, Б.А. Панченко, Ю.Г. Пастернак, И.С. Полянский, Л.И. Пономарев, А.Г. Романов, Ю.П. Саломатов, А.М. Сомов, Н.А. Тестоедов, В.Н. Тяпкин, С.Н. Шабунин, M. Arrebola, K.K. Chan, Y.J. Cheng, J.P. Choi, B. Clerckx, D.T. Emerson, M. Ettorre, M.Y. Frankel, F.F. Manzillo, D. McGrath, W. Menzel, W.F. Moulder, A.B. Numan, C.D. Paola, L. Poli, S. Sakagami, M.K. Saleem, R.T. Schwarz, F. Venneri, W.-Q. Wang, K. Wincza, Y.F. Wu, H.-X. Xu, J. Yan, B. Yang, L. You, O. Yurduseven, J.A. Zhang, G. Zheng, L.-H. Zhong.

Значительный вклад в разработку и исследование алгоритмов обработки сигналов внесли Ю.И. Абрамович, О.Е. Антонов, А.В. Ашихмин, В.И. Белов, Б.Ф. Бондаренко, В.А. Вентцель, А.Д. Виноградов, В.И. Глазьев, И.С. Гуткин,

В.П. Демин, В.П. Денисов, Р.А. Зацерковский, Ю.В. Ильченко, В.В. Караваев, Д.И. Леховицкий, В.Н. Манжос, В.К. Мезин, И.Д. Меркуленко, А.А. Поваляев, В.Ф. Писаренко, С.Ю. Платонов, Ю.А. Рембовский, В.В. Сазонов, О.В. Смидович, С.Е. Фалькович, Ю.А. Федоркин, В.Р. Хачатуров, В.Н. Шевченко, В.В. Ширков, A. Barabell, F. Belloni, K.M. Buchley, M. Buhren, J.P. Burg, J. Capon, S. Chandran, C.D. Crews, B. Friedlander, P.J.D. Gething, A.B. Gershman, K.V.S. Hari, D.H. Johnson, T. Kailath, M. Kavech, R.L. Kellogg, V. Koivunen, R. Kumaresan, Z.-Q. Luo, E.E. Mack, X. Mestre, M.P. Moudi, B. Ottersten, M. Pesavento, R. Poisel, B.D. Rao, D.P. Reilly, A. Richter, P. Van Rooyen, P. Roux, T. Sarkar, R.O. Schmidt, H.L. Van Trees, D.W. Tufts, M. Wax, A. Weiss, G. Xu, I. Ziskind.

В то же время, многие важные вопросы, связанные с разработкой и исследованием МЛА, решены в недостаточном объеме:

- разработка и исследование методов борьбы с искажениями поля с помощью расчета значений поля на удалении от антенного устройства, проводимого на основе измеренных комплексных амплитуд поля;

- разработка и исследование методов улучшения помехоустойчивости с помощью пересчета измеренных электрических компонент поля в магнитные, менее искаженные рассеивателями на трассе распространения сигнала, и конструкций антенн, реализующих эти методы;

- разработка реконфигурируемых антенных устройств на основе универсального конструктивного элемента, позволяющего масштабировать и адаптировать конечное изделие под решаемую задачу;

- разработка МЛА с полноазимутальным сканированием без эффекта затенения каналов;

- разработка МЛА на основе линзы с уменьшенными габаритными размерами, достигаемое за счет применения методов трансформационной оптики;

- разработка МЛА с полноазимутальным сканированием на основе поляризационно-селективного зеркала;

- разработка МЛА с полноазимутальным сканированием и возможностью работы с двумя поляризациями;

- разработка антенн с тороидальной и веерной диаграммами направленности на основе однопроводной линии передачи.

Объектом исследования являются МЛА с физическими и виртуальными элементами, позволяющие существенно повысить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры связи и управления.

Предметом исследования являются технологии, способы и методы разработки МЛА, состоящих из виртуальных и физических антенных элементов, и предназначенных для существенного улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Целью исследования является разработка моделей, методов проектирования и анализ характеристик МЛА, использование которых позволяет существенно повысить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- анализ современного состояния и тенденций развития теории, техники и технологии производства МЛА и методов определения направления на ИРИ;
- разработка и исследование методов создания виртуальных антенных элементов, представляющих собой комплексные значения ЭМП в точках, расположенных по окружности на некотором удалении от физических антенных элементов, на которых производилось измерение значений падающей волны, являющихся исходными данными для расчёта виртуальных элементов;
- разработка и исследование конструкционного элемента для построения реконфигурируемых антенн и фазовращателей, для управления которым используется оптоволоконные линии, не создающие и не подверженные радиопомехам;
- разработка диаграммообразующей схемы, позволяющей построить МЛА с полноазимутальным сканированием без эффекта затенения каналов;
- разработка конструкции линзы с уменьшенными вертикальными размерами с помощью метода трансформационной оптики, предназначенной для создания МЛА с двухкоординатным полусферическим сканированием;
- разработка конструкции поляризационно-селективного рефлектора, образующего геометрическую фигуру в виде усеченного сверху и снизу эллипсоида вращения;
- разработка антенных элементов и системы запитки для построения МЛА с двумя поляризациями и полноазимутальным сканированием;
- разработка антенн на основе однопроводной линии, использующих принцип работы антенны Франклина для формирования тороидальной диаграммы направленности, и дифракционную решетку для формирования веерной диаграммы направленности.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- 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;
- разработан метод 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.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методов синтеза многолучевых и реконфигурируемых антенных устройств, которые могут включать в себя виртуальные и физические антенные элементы, а также способов оценки угловых координат ИРИ с улучшенной помехоустойчивостью.

Практическая значимость работы. Полученные результаты разработки и исследования способов создания виртуальных антенных элементов и расчёта магнитной компоненты поля, на основе измеренного с помощью векторной антенны, электрического поля, позволяют реализовать радиоэлектронную аппаратуру с улучшенной устойчивостью к дифракционным искажениям пространственно-временной структуры принимаемой электромагнитной волны. Разработанная конструкция управляемого метаматериала является универсальной основой для создания реконфигурируемых антенн и фазовращателей, в том числе - отражательных фазированных антенных решеток. Разработанные МЛА позволяют улучшить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры, за счет реализации большого значения коэффициента усиления каждого формируемого главного лепестка диаграммы направленности, при этом сектор покрытия остается широкоугольным, благодаря возможности полноазимутального, или - полусферического сканирования. Разработанные конструкции антенн на основе однопроводной линий могут использоваться в системах связи для улучшения помехоустойчивости, в которых относительное перемещение объектов

ограничено из-за практики применения, и, следовательно, не требуется реализация полусферической зоны обзора.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использовались методы анализа и параметрического синтеза антенных устройств, методы вычислительной электродинамики, методы физического и компьютерного экспериментального исследования.

Положения, выносимые на защиту:

– формирование ВАР, позволяющих уменьшить негативное влияние близлежащих рассеивателей на качество принимаемого сигнала, без использования какой-либо априорной информации о геометрии и материальных свойствах самих рассеивателей, и обладающих изменяющимся, в зависимости от частоты, радиусом, а также – позволяющих реализовать фильтрацию измеряемых, с помощью физических антенных элементов, комплексных амплитуд ЭМП, тем самым обеспечивая, существенное повышение точности аппроксимации пространственного распределения поля в окрестности расположения элементов физической антенной решетки;

– 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;

– управляемый метаматериал в виде электромагнитного кристалла с коммутационными элементами в его узлах позволяет синтезировать отражающую поверхность сложной формы с точностью, определяемой расстоянием между узлами, использование которого позволяет реализовать реконфигурируемые широкополосные отражательные антенны, включая отражательные фазированные антенные решетки, а также - фазовращатели;

– двухуровневая линза с перфорированным металлическим листом, размещенным по центру тела линзы, обеспечивает перенос электромагнитной энергии от портов в нижней части к антенным элементам в верхней части, и может использоваться в качестве диаграммообразующей схемы для МЛА с полноазимутальным сканированием без эффекта затенения тела линзы;

– применение трансформационной оптики позволяет уменьшить вертикальные размеры линзы, состоящей из металлодиэлектрических пластин, до 5 раз, без существенного ухудшения направленных свойств МЛА с полусферическим сканированием, построенной на ее основе;

– реализация рефлекторов МЛА в форме усеченного параболоида вращения, или – сферы, с использованием тонкопроволочной сетки с проводниками, размещенными под углом 45° к продольной оси зеркала, позволяет реализовать формирование многолучевой ДН в широкой полосе частот при использовании офсетных облучателей;

– использование полусферической диэлектрической линзы, возбуждаемой с помощью, размещенной вокруг ее основания системы облучателей с одной или двумя ортогональными поляризациями, позволяет реализовать МЛА с полноазимутальным сканированием;

– на основе однопроводной линии, возбуждающей систему линейных излучателей, возможно реализовать антенны с тороидальной, а также – с всерной диаграммами направленности.

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.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XII международный семинар «Физико-математическое моделирование систем» (г. Воронеж, 2014); XXII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2016); 26-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо'2016 (г. Севастополь, 2016); XXIV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2018); XXVI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2020); IV научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2020 «Физика и технические приложения волновых процессов», ФИТПВП-2020 (г. Самара, 2020); VII Московская микроволновая неделя (г. Москва, 2020); международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2020); XXVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2021); международная конференция «Progress in electromagnetics research symposium», PIERS 2021 (КНР, г. Ханчжоу, 2021); международная конференция «Progress in electromagnetics research symposium», PIERS 2021 (КНР, г. Ханчжоу, 2022); международная научная конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2021); всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн» (г. Санкт-Петербург, 2021); XXVIII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2022); всероссийская научно-техническая конференция «Приборостроение в XXI веке - 2022. Интеграция науки, образования и производства» (г. Ижевск, 2022); XXIX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2023); всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы развития систем и сетей связи»

(г. Ставрополь, 2023); XXX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2024).

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены в АО НПП «Автоматизированные системы связи», АО НВП «ПРОТЕК», АО «НКТБ «Феррит», АО «Электросигнал». Также, результаты работы внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ», дисциплина «Системы подвижной радиосвязи».

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертации, были использованы в следующих научно-исследовательских работах, в которых автор являлся руководителем:

- 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»;

или исполнителем:

- 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».

Личный вклад автора заключается в получении результатов диссертационной работы, обладающих научной новизной и выносимых на защиту.

В работах [5, 7, 32] автором проведен анализ перспективных направлений разработки МЛА на основе линз, а также радиопеленгационных антенных решеток, работающих в широкой полосе частот. В [13, 14, 17, 29, 34, 35, 36, 45, 53, 55, 59, 64, 65, 68, 69, 70] исследован метод формирования ВАР с точки зрения его эффективности для уменьшения негативного влияния искажений принимаемого ЭМП на рабочие характеристики радиоэлектронной аппаратуры. В работах [9, 16, 30, 33, 56, 57, 66, 72] была разработана и исследована конструкция векторной антенны в виде куба и тетраэдра, а также метода пеленгации на основе рассчитанных значений пространственных компонент магнитного поля. В [1, 2, 21, 24, 27, 28, 38, 39, 40, 41, 58, 60, 61, 62, 74] разработан

и исследован управляемый метаматериал, на основе которого был построен ряд реконфигурируемых антенн и фазовращателей. В работах [3, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 18, 19, 20, 23, 42, 43, 46, 48, 49, 50, 51] были разработаны и исследованы конструкции МЛА, обладающие возможностью полноазимутального сканирования. В работах [22, 31, 63, 73] была разработана МЛА с полусферическим сканированием на основе линзы из многослойной печатной платы с уменьшенными вертикальными размерами. В [25, 26, 44, 47, 52, 54, 67, 71,] разработаны и исследованы конструкции МЛА на основе полусферической диэлектрической линзы с возможностью работы с одной или двумя линейными поляризациями. В [75] разработана МЛА на основе поляризационно-селективного зеркала, в которой в качестве облучателей могут использоваться различные проволочные или печатные антенны.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии: п.2. Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.; п.3. Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами; п.9. Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 111 научных работах, из них 46 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.2.14, 19 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 3 монографии, 3 патента РФ и 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ, 37 работ опубликованы в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 345 наименований. Основная часть работы изложена на 307 страницах, содержит 172 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы основные положения и результаты, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора.

В первой главе представлена оценка современного состояния научно-технической области, посвященной разработке и производству антенных устройств и методов, предназначенных для повышения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры. В качестве ключевых решений были рассмотрены МЛА, способные увеличить значение отношения сигнал/шум за счет большого коэффициента усиления без существенного уменьшения сектора покрытия

антенны, а также основные методы пеленгации, необходимые для определения направления на ИРИ и его удержания в узком луче МЛА.

В параграфе 1.1 представлен анализ современного состояния и перспективы развития теории, техники и методов разработки МЛА. На основе открытых научно-технических источников был проведен обзор различных типов МЛА: пассивные МЛА на основе линз, рефлекторов и диаграммообразующих схем; активные и пассивные многолучевые фазированные антенные решетки; цифровые МЛА. Рассмотрены имеющиеся достоинства и недостатки каждого типа МЛА. По результатам проведенного анализа сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели диссертационной работы.

В параграфе 1.2 был представлен обзор классических методов пеленгации и методов сверхразрешения, применение которых необходимо для эффективного удержания в луче МЛА подвижного приемопередатчика. Отмечена восприимчивость данных методов к помехам и искажениям сигнала из-за рассеивателей, находящихся на удалении и в непосредственной близости к антенне.

Во второй главе разработан и исследован метод ВАР, предназначенный для борьбы с влиянием рассеивателей на принимаемый радиосигнал. Суть метода ВАР можно сформулировать следующим образом: комплексные напряжения, регистрируемые на нагрузках элементов реальной антенной решетки (РАР), используются для расчета комплексных амплитуд электрического поля в произвольных точках пространства, находящихся в плоскости РАР и в непосредственной близости от неё. Отметим, что количество точек, в которых рассчитываются значения поля, не ограничивается ничем, кроме времени вычисления. Координаты этих точек (которые можно трактовать как координаты элементов ВАР) также могут быть любыми, однако очевидно, что с увеличением расстояния от РАР точность предсказания структуры поля может уменьшаться. Таким образом, располагая ограниченным количеством полезных сигналов с элементов РАР с заранее заданной конфигурацией (числом элементов, формой и размерами), можно получить значения напряженности поля, которые по сути являются сигналами с элементов ВАР любой конфигурации.

Для формирования ВАР использовался метод вспомогательных источников с применением квазирешения методом Левенберга-Марквардта и методом сопряженных градиентов. Исследование эффективности ВАР производилось на основе антенны мобильного телефона с учетом влияния корпуса телефона, головы пользователя и его руки (рисунок 1). Для сравнения использовался интерференционно-корреляционный метод (ИКМ) пеленгации.

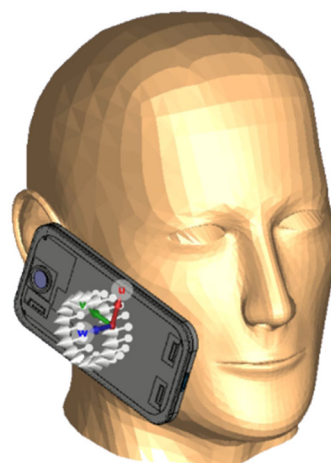


Рисунок 1 – Исследуемая модель с учетом влияния головы пользователя и корпуса телефона

В параграфе 2.1 было проведено исследование следующего варианта антенной решетки, размещаемой в телефоне: РАР – 18 элементов, радиус 20 мм; ВАР – 18 элементов, радиус 80 мм; число вспомогательных источников равно 7; учитывалось влияние только корпуса телефона и головы пользователя. Полученные результаты демонстрируют увеличение точности пеленгования и снижение абсолютной ошибки в 1,5-2 раза в диапазоне от 1,2 ГГц до 5 ГГц (исследовался диапазон 0,1-5 ГГц). Причем, использование метода сопряженных градиентов позволяет более точно определять направление на ИРИ, однако обладает меньшей частотной устойчивостью.

Исследовалась возможность применения ВАР для восстановления или получения дополнительных значений фаз принимаемого сигнала, что может

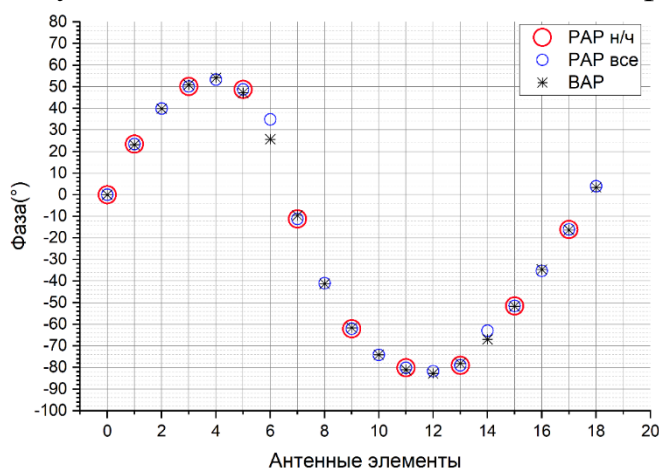


Рисунок 2 – Значения фаз Е-компоненты поля на окружности радиусом 20 мм

быть востребовано в системах связи с советующими типами модуляции. В данном случае, для формирования ВАР использовались значения комплексного напряжения с каждого второго элемента РАР; при математическом моделировании учитывалось влияние только корпуса телефона. Как видно из рисунка 2, фазы элементов ВАР достаточно точно совпадают с измеренными значениями. Однако, при увеличении радиуса ВАР до 80 мм, точность расчета фазовой

структуры поля снижается, несмотря на уменьшение влияние корпуса на структуру ЭМП с ростом расстояния.

В параграфе 2.2 исследовался вариант модели, учитывающий наличие головы и руки пользователя в непосредственной близости к корпусу телефона и приемной антенной системе. Результаты математического моделирования показали, что применение методов ВАР позволяет существенно (более чем в два раза при использовании процедуры квазирешения) уменьшить погрешность определения направления на ИРИ в диапазоне до 2,7 ГГц. На более высоких частотах наблюдается существенное увеличение абсолютной погрешности пеленгования. Отметим, что на этот же диапазон приходится и максимальная погрешность пеленгования с использованием РАР. Метод с использованием квазирешения показал себя более эффективным, чем обычный метод формирования ВАР, основанный на решении системы линейных алгебраических уравнений. Кроме того, выявилась и общая тенденция к сужению рабочего диапазона частот обычного метода формирования ВАР при увеличении радиуса ВАР.

Причиной таких больших погрешностей является сильное искажение исходной информации для формирования ВАР (комплексные амплитуды сигналов на элементах РАР и ее геометрия) из-за влияния нескольких рассеивателей (корпуса телефона, головы и руки пользователя). Обычный метод

формирования ВАР (без квазирешения), хотя и показал низкую эффективность в условиях сильного искажения поля, но, учитывая инвариантность данного метода к внешним условиям, можно использовать результаты его применения в качестве начальных значений для методов формирования ВАР с процедурой квазирешения.

В параграфе 2.3 исследовалась возможность повышения эффективности метода ВАР за счет выбора оптимального значения её радиуса в зависимости от частоты. В качестве РАР рассматривалась круговая 18-элементная антенная решетка радиусом $R_{RAR} = 20$ мм; радиус ВАР принимал значения $1,2 \cdot R_{RAR}$ и $2,2 \cdot R_{RAR}$; в ходе математического моделирования учитывалось влияние корпуса телефона и головы пользователя; диапазон рабочих частот 0,5-5 ГГц. Выяснено, что больший радиус ВАР даёт меньшую погрешность на низких частотах, но увеличивает промах в оценке пеленга на высоких частотах. Проведенные исследования позволяют предположить, что рост погрешности с ростом частоты происходит вследствие превышения расстояния между РАР и ВАР значения $0,25 \cdot \lambda$.

Исходя из указанных наблюдений, оптимальным представляется переменный радиус ВАР, который изменяется в зависимости от частоты. Было предложено три модели изменения радиуса: 1) скачкообразное изменение радиуса ВАР со значения $2,2 \cdot R_{RAR}$ на $1,2 \cdot R_{RAR}$ на частоте 3 ГГц; 2) трёхступенчатое изменение радиуса ВАР – $2,2 \cdot R_{RAR}$ до 2,5 ГГц, $1,7 \cdot R_{RAR}$ в диапазоне 2,5-3,5 ГГц, $1,2 \cdot R_{RAR}$ от 3,5 ГГц; 3) линейное изменение радиуса ВАР от $2,2 \cdot R_{RAR}$ до $1,2 \cdot R_{RAR}$. На рисунке 3 показаны зависимости абсолютных погрешностей пеленгования, полученные с помощью ВАР с радиусами согласно: модели 1 – синяя линия; модели 2 – черная линия; модели 3 – красная линия.

Из анализа зависимостей следует, что наименьшая погрешность пеленгования достигается при использовании двухуровневой модели 1, при этом

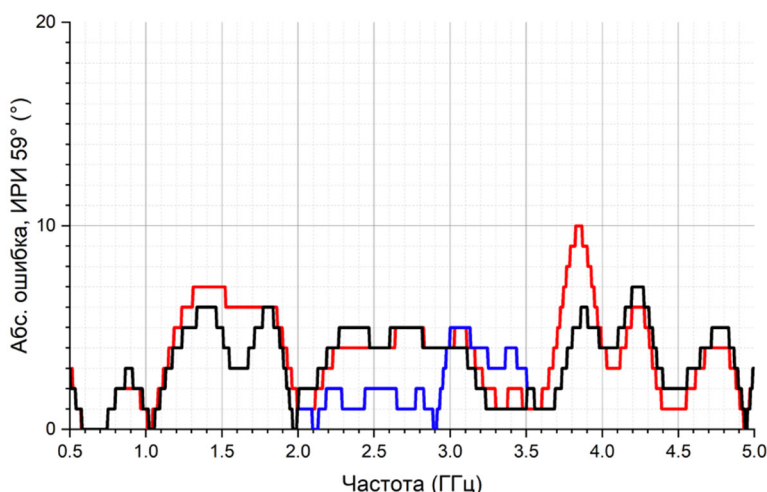


Рисунок 3 – Абсолютные ошибки пеленгования при использовании ВАР с изменяющимся в зависимости от частоты радиусом

СКО снижается в 3,44 раза относительно использования РАР для случая прихода волны с угла 59° и в 1,36 раза для 137° . При этом линейная модель 3 обладает несколько меньшей эффективностью и позволяет уменьшить значения СКО в 2,8 раза для 59° и в 1,35 раза для случая 137° . Однако, модель 3 является наиболее универсальной, позволяющей устранить необходимость

выбора количества уровней изменений рабочей частоты или ширины участков разбиения

частоты, оперируя только значениями радиуса ВАР на границах исследуемого диапазона.

В параграфе 2.4 исследовался случай сильных искажений амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в месте расположения одного или нескольких антенных элементов РАР. Для компенсации негативного влияния этих искажений предложено заменять данные элементы РАР на виртуальные антенные элементы, формируя виртуально-реальную антенную решетку (ВРАР). После, на ее основе, строилась ВАР с радиусом большим чем у ВРАР и изменяющимся в зависимости от частоты. Результаты исследования показали, что в случае исключения (и последующего восстановления с помощью метода ВАР) данных о структуре ЭМП на трех элементах (1, 7, 13; всего элементов было 18) использование ВАР, и особенно ВРАР, приводит к существенному снижению среднеквадратической ошибки пеленгования в рассматриваемом диапазоне частот.

В параграфе 2.5 исследовалась эффективность применения метода ВАР для борьбы с искажениями, вызванными корпусом носителя мобильного радиопеленгаторного комплекса. В качестве носителей рассматривались модель микроавтобуса (уменьшенная в 6,5 раз для ускорения расчетов) и МТ-ЛБ, рисунок 4.

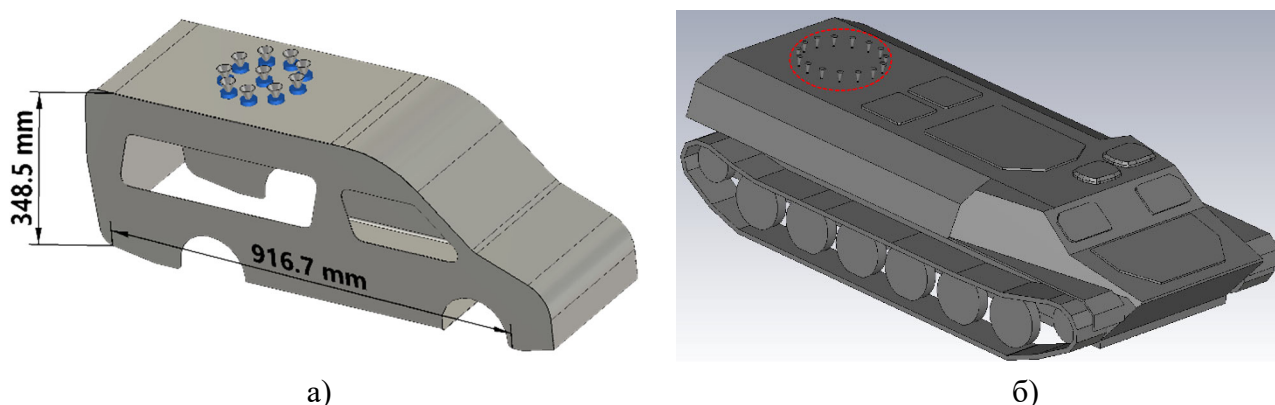


Рисунок 4 – Исследуемые модели носителей: микроавтобус (а) и МТ-ЛБ (б)

Размещенный на крыше микроавтобуса радиопеленгатор представляет собой антенную систему, сформированную из 9 несимметричных конических вибраторов, установленных вокруг центрального опорного антенного элемента на окружности радиусом 77 мм. Антенная решетка из конических элементов была рассчитана для работы в диапазоне частот от 0,4 до 1,2 ГГц, в котором наблюдаются наиболее существенные искажения ЭМП, вызванные корпусом носителя. На основе данной РАР была сформирована ВАР из 30 элементов, размещённых эквидистантно на кольце радиусов 150 мм. Исследования показали, что ВАР позволила уменьшить погрешность оценки пеленгов в 1,55 раза, и в 1,67 раза уменьшить среднеквадратическое отклонение (рисунок 5).

В случае МТ-ЛБ, параметры РАР были следующие: 15 антенных элементов в виде несимметричных конических вибраторов высотой 110 мм; радиус решетки 500 мм. ВАР состояла из 30 антенных элементов, размещенных на кольце радиусом 1200 мм. Математическое моделирование

показало, что благодаря применению метода ВАР удалось уменьшить среднеквадратическое отклонение оценки пеленга в 1,529 раза, а погрешность в 1,584.

В третьей главе было проведено исследование методов оценки пеленгов с помощью магнитной компоненты поля, пересчитываемой из электрической компоненты, которая была измерена разработанной векторной антенной. Данный метод позволяет уменьшить погрешность пеленгования, т.к. магнитная компонента поля испытывает меньшие искажения на трассе распространения сигнала из-за преимущественно электрического характера встречаемых на практике рассеивателей.

В параграфе 3.1 была разработана векторная антенна, состоящая из 12 симметричных электрических вибраторов, расположенных на ребрах куба с длиной грани 50 мм, рисунок 6. Конструкция данной векторной антенны

является простой, т.к. в ней не используются рамочные антенные элементы и устройства их согласования и симметрирования. Кроме того, действующая длина электрически малого симметричного электрического вибратора существенно больше, чем действующая длина рамочной антенны эквивалентных размеров.

На основе второго уравнения Максвелла в интегральной форме были получены формулы для расчета пространственных компонент магнитного поля с помощью напряжений, снятых с симметричных вибраторов и соответствующих пространственным компонентам электрического поля. Далее, полученные значения компонент ЭМП использовались для пеленгации с

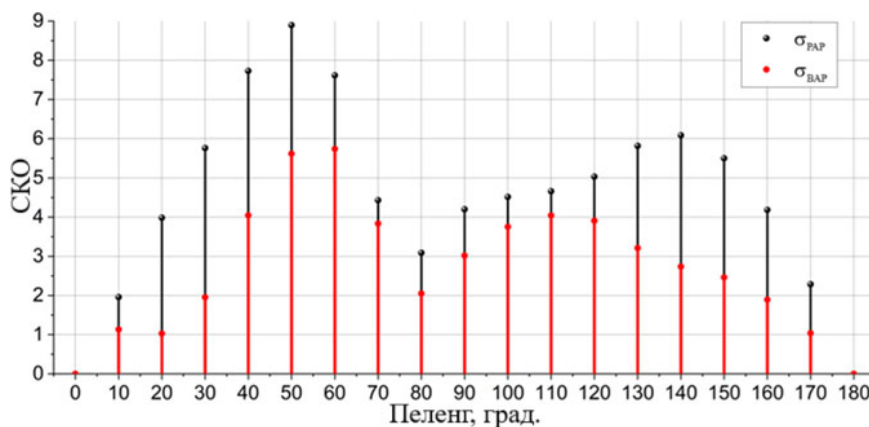


Рисунок 5 – Столбчатая диаграмма среднеквадратического отклонения оценок пеленга для случая использования микроавтобуса в качестве носителя

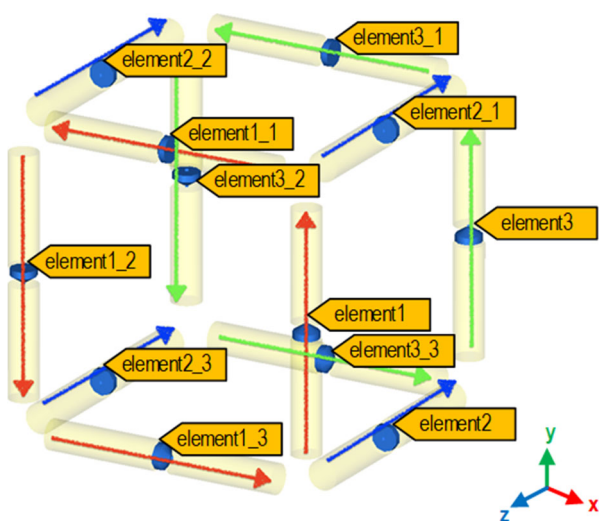


Рисунок 6 – Векторная антенна в виде куба

помощью метода на основе определения реальной части вектора Пойнтинга (мнимая часть описывает реактивную долю мощности, вызванную рассеянием падающих волн на антенне и близлежащих объектах). Пространственная ориентация вычисленного вектора Пойнтинга указывает направление прихода волны.

На примере малого БПЛА была исследована эффективность применения векторной антенны для борьбы с искажениями из-за корпуса носителя, рисунок 7.

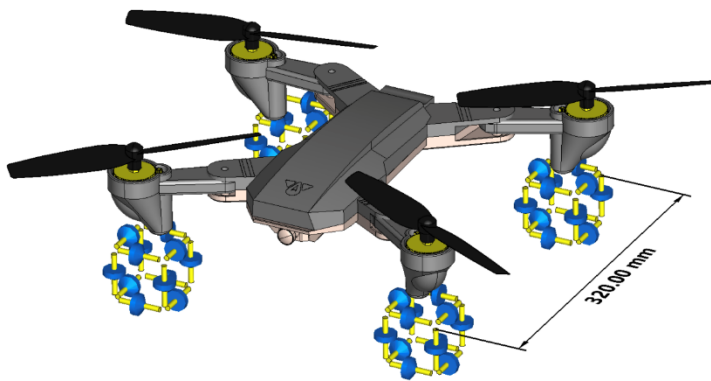


Рисунок 7 – Модель квадрокоптера с установленными векторными антеннами в виде куба

Полученные результаты показали, что использование магнитного поля для определения пеленгов позволяет существенно повысить точность по сравнению со случаем применения электрического поля. Отметим, что при использовании только одной z-компоненты поля, удастся достичь большей точности, чем при использовании суммарного поля. Видимо, это вызвано

большим искажением x- и y-компоненты поля, что приводит к существенному росту погрешности при определении пеленга на основе всех трех компонент поля.

В параграфе 3.2 была разработана и исследована векторная антенна в виде тетраэдра, чья конструкция позволяет уменьшить число симметричных вибраторов в два раза по сравнению с кубической антенной, рисунок 8.

Напряжения u_n на выходах элементов векторной антенны, определяются как скалярные произведения единичных векторов, задающих направления пространственной ориентации симметричных электрических вибраторов, с учетом полярности их нагрузок в фиксированный момент времени, и вектора $\vec{E} = (E_x; E_y; E_z)^T$,

умноженные на действующую длину симметричного электрического вибратора h_d .

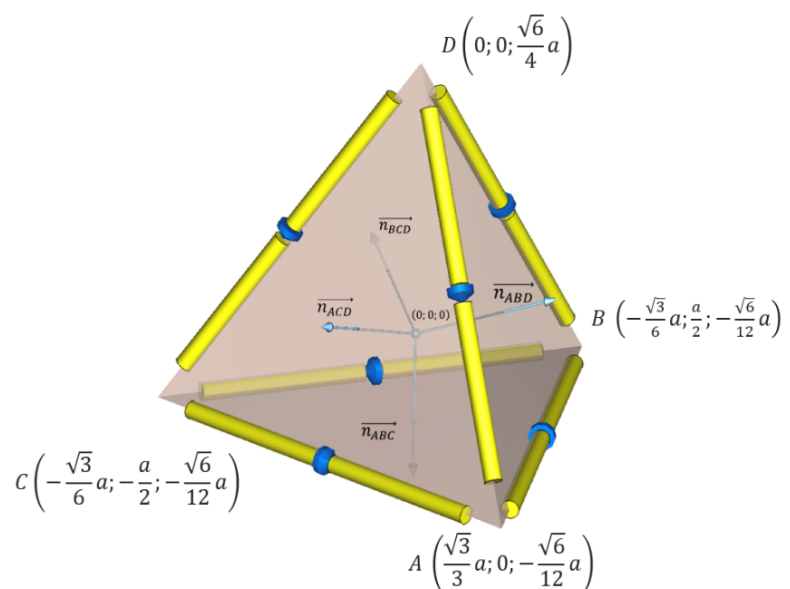


Рисунок 8 – Векторная антенна в виде тетраэдра

На основе формул для расчета напряжений выводятся выражения для определения напряженности электрического поля:

$$E_x = \frac{u_3 - u_1 + 4u_4 - 2u_5 - 2u_6}{3\sqrt{3} \cdot h_d}; E_y = \frac{u_1 + u_3 - u_2 + u_5 - u_6}{3 \cdot h_d}; E_z = -\frac{u_4 + u_5 + u_6}{\sqrt{6} \cdot h_d}. \quad (1)$$

Для нахождения векторов напряженности магнитного поля $\vec{H}$, направленных по внешним нормальям к граням тетраэдра, использовалось второе уравнение Максвелла:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{\sqrt{6}}{i\omega\mu_a h_d a} \cdot \left(u_5 + \frac{2}{3}u_2 - u_6 - \frac{u_1}{3} - \frac{u_3}{3} \right); \\ H_y &= -\sqrt{2} \cdot \frac{u_1 - u_5 + 2u_4 - u_3 - u_6}{i\omega\mu_a h_d a}; \\ H_z &= -\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u_1 + u_2 + u_3}{i\omega\mu_a h_d a}. \end{aligned} \quad (2)$$

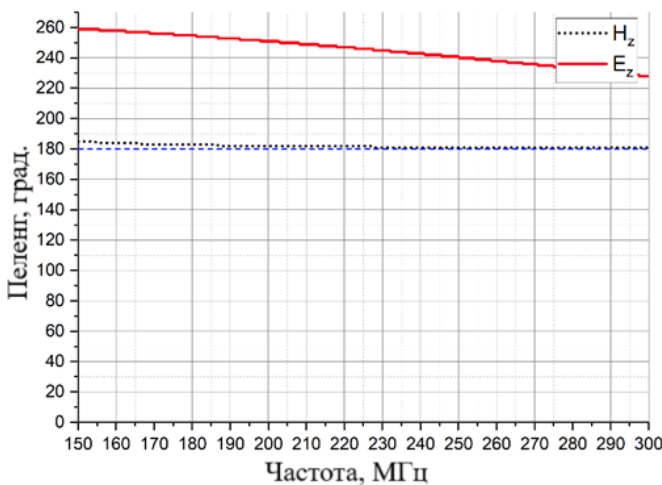


Рисунок 9 – Частотная зависимость пеленгов при истинном азимутальном угле 180°

Для оценки эффективности применения векторных антенн в виде тетраэдра для борьбы с искажениями поля, рассматривался случай размещения трех таких антенн на малом БПЛА. Данная модель облучалась плоской волной с эллиптической поляризацией с отношением осей 10:1. Полученные частотные зависимости пеленгов (рисунок 9) показывают существенный выигрыш в точности при использовании z-компоненты магнитного поля по сравнению

электрической компонентой.

В четвертой главе был разработан и исследован управляемый метаматериал, представляющий собой электромагнитный кристалл, в узлах кристаллической решетки которого размещались коммутирующие элементы (МЭМС-переключатели или pin-диоды, включая опто-управляемые варианты), рисунок 10. Принцип работы метаматериала заключается в следующем: при разомкнутых узлах, волна свободно проходит сквозь метаматериал; при замыкании специально выбранных узлов, формируется поверхность соответствующей формы, от которой электромагнитная волна испытывает отражение.

Предложенный метаматериал является унифицированным конструкционным элементом для создания достаточно широкой номенклатуры СВЧ-устройств: фазовращатели, рефлекторные антенны, фазированные антенные решетки.

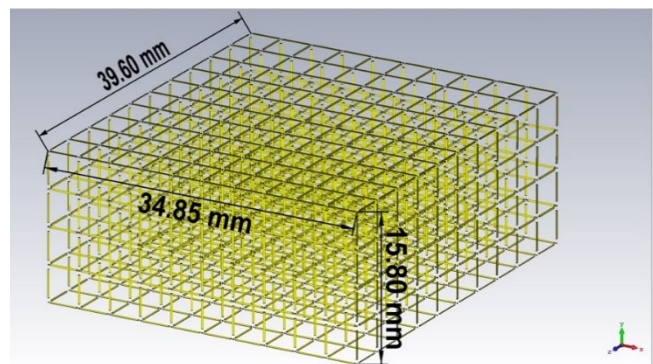


Рисунок 10 – Управляемый метаматериал для диапазона 5,85-8,2 ГГц

В параграфе 4.1 представлены результаты исследования оптимальной длины ребра разработанного метаматериала. Выяснено, что в большинстве задач предпочтительными являются ячейки с ребрами в $\lambda/8$ и $\lambda/16$, т.к. они обеспечивают широкий диапазон рабочих частот, большой коэффициент отражения от закороченных участков управляемого метаматериала, а также позволяют формировать отражающую поверхность с достаточно хорошим разрешением.

В параграфе 4.2 были получены частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости для управляемого метаматериала, рассчитанные на основе S-параметров. Также, был разработан отражательный волноводный фазовращатель на основе метаматериала, управляющий фазой с помощью изменения положения отражающей поверхности. На рисунке 11 показано, что замыкание различных узлов метаматериала приводит к изменению расстояния, которое волна проходит перед отражением, а следовательно, и к изменению фазы.

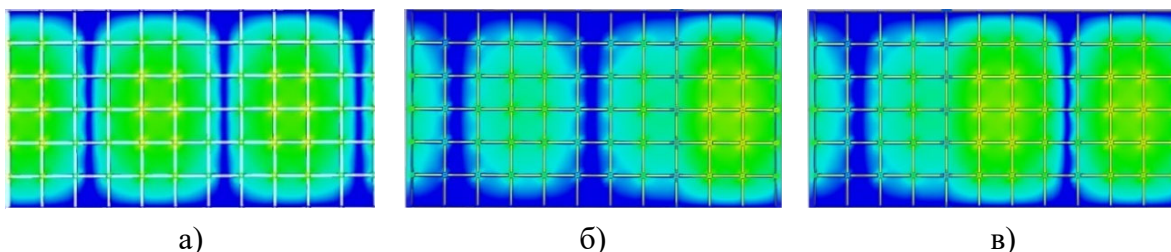


Рисунок 11 – Картина Е-поля при отсутствии замкнутых плоскостей (а), замкнута третья плоскость (б), замкнута седьмая плоскость (в)

В параграфе 4.3 была разработана реконфигурируемая рефлекторная антенна, представляющая собой прямоугольный параллелепипед, составленный из ячеек управляемого метаматериала. Результаты математического моделирования показали, что предложенная антенна обладает диаграммой направленности, приближенной к обычным металлическим рефлекторным антеннам, и при этом способна изменять направление главного лепестка для адаптации к текущей помеховой обстановке. Отметим, что в диапазоне частот от 10 до 18 ГГц коэффициент направленного действия (КНД) антенны находился в пределах от 19,2 до 21,3 дБ, а КПД антенны не опускался ниже 92 %.

В параграфе 4.4 было проведено исследование влияния применяемых коммутирующих элементов на рабочие характеристики управляемого метаматериала. Рассматривались два типа коммутирующих элементов: pin-диоды и МЭМС переключатели. Для учета их характеристик, в ходе математического моделирования использовались SPICE и Touchstone модели. Результаты исследования показали, что использование МЭМС-переключателей позволяет значительно расширить диапазон рабочих частот по сравнению с pin-диодами, а также улучшить S-параметры управляемого метаматериала.

В пятой главе были разработаны и исследованы конструкции антенн, предназначенные для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

В параграфе 5.1 была разработана конструкция МЛА на основе линзы с полноазимутальным обзором для частотного диапазона 27-29 ГГц. Габаритные размеры антенны: диаметр – 20,7 мм, высота – 3 мм. В качестве материала подложек использовался Rogers 5880 (можно использовать аналоги этого материала – FSD220G или RP220). Общий вид разработанной антенны представлен на рисунке 12. Предложенная МЛА полноазимутального обзора формирует 16 лепестков, КНД каждого из которых составляет около 10-11 дБи, а КСВН не превышает значение 1,7.

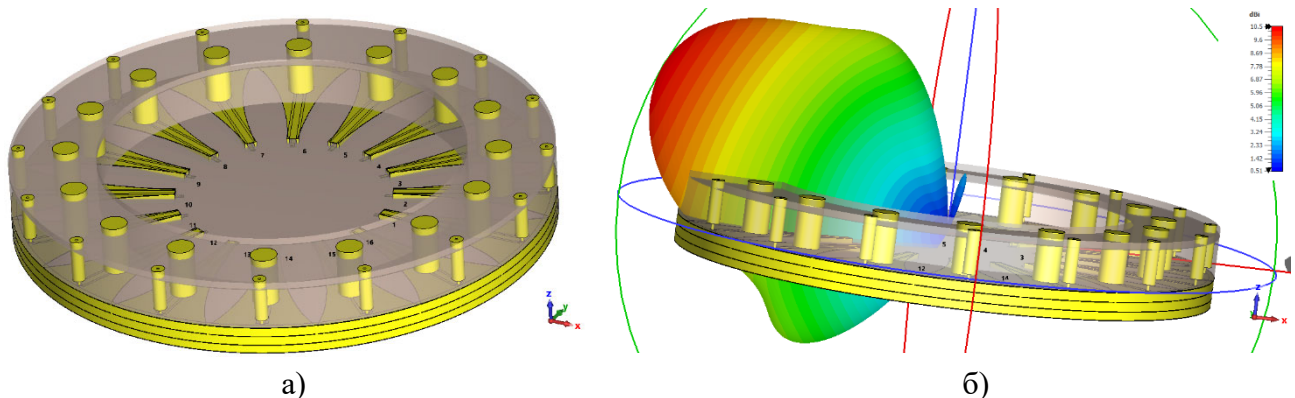


Рисунок 12 – МЛА на основе двухуровневой линзы и несимметричных вибраторов с экраном: общий вид (а) и диаграмма направленности на частоте 28 ГГц (б)

Диаграммообразующая схема антенны представляет собой плоскую диэлектрическую цилиндрическую линзу из однородного диэлектрика (как вариант, возможно использование плоской линзы Люнеберга), разделенную на две части метаповерхностью в виде перфорированного металлического листа. Данная двухуровневая линза позволяет реализовать полноазимутальное формирование диаграмм направленности МЛА за счет того, что к верхней части диаграммообразующей схемы, с помощью полосковых трансформаторов, подключаются антенные элементы, а к нижней – приемно-передающая система.

В параграфе 5.2 была предложена МЛА, состоящая из метаматериальной линзы на основе многослойной печатной платы, и системы облучателей в виде симметричных электрических вибраторов, расположенных над экраном (рисунок 13). Линза была разработана с помощью метода трансформационной оптики: тело линзы было сжато вдоль вертикальной оси, а, для компенсации уменьшения электрического пути волны в вертикальном направлении, в

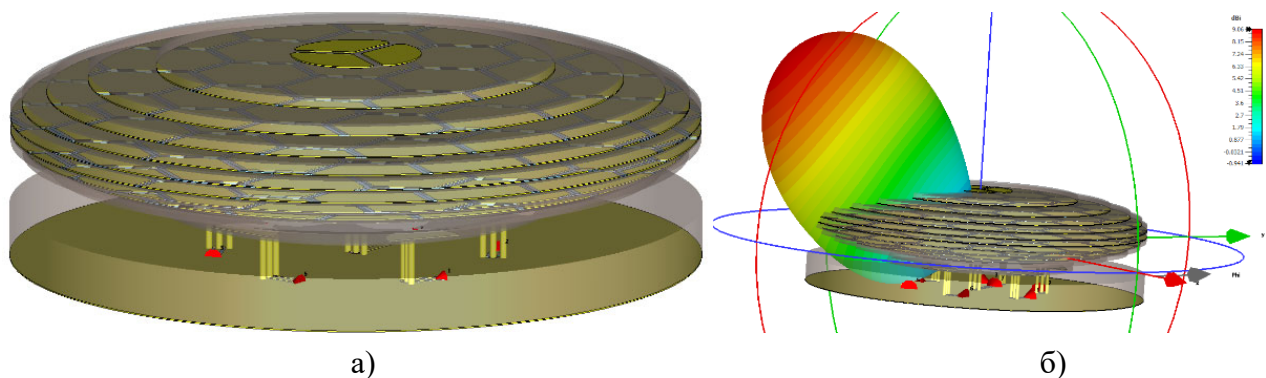


Рисунок 13 – МЛА с двухкоординатным сканированием в полусферическом секторе: общий вид (а) и диаграмма направленности на частоте 28 ГГц (б)

конструкцию была введена анизотропия коэффициента преломления – увеличение значения коэффициента преломления в вертикальном направлении в такое же число раз, во сколько сферическую линзу сжали по вертикали. Диаметр линзы составил 10 мм, высота 2 мм; диапазон рабочих частот 27-29 ГГц. Рассматриваемая МЛА обладает сектором диаграммоформирования по азимуту от 0° до 360°, а по углу места от 0° до 90°. МЛА способна формировать 7 лучей с КНД около 9,5 дБ. S_{11} -параметры не превышают значение -10 дБ во всей исследуемой полосе частот.

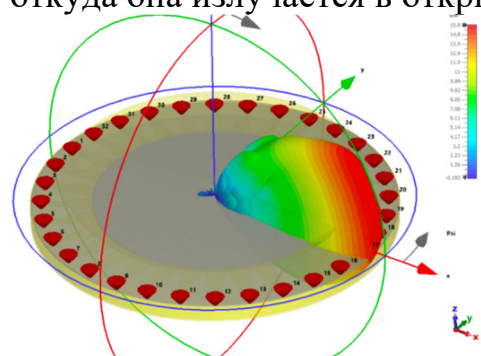
В параграфе 5.3 была разработана МЛА на основе двухуровневой линзы и несимметричного ТЕМ-рупора, формирующая 32 лепестка веерной формы в полном азимутальном секторе (рисунок 14).



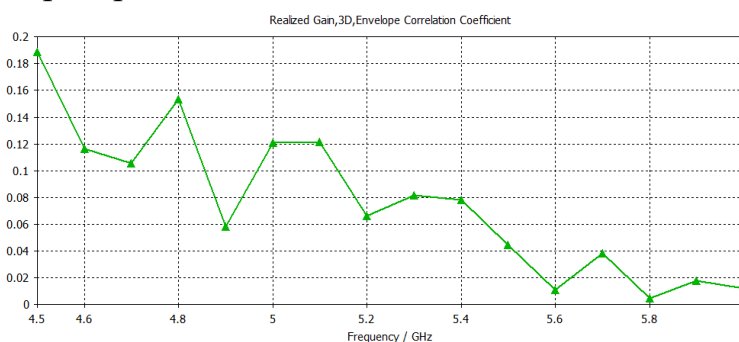
Рисунок 14 – МЛА основе двухуровневой линзы и несимметричного ТЕМ-рупора

представляла собой конструкцию из трансформирующих полосков, расставленных по кругу и объединенных в единую структуру. К трансформирующим полоскам осуществляется подключение многоканального приемопередатчика

или коммутатора, при этом провода для подключения находятся снизу цилиндра, образующего несимметричный ТЕМ-рупор, и не оказывают затеняющего эффекта на МЛА. Верхняя часть двухуровневой линзы представляет собой перфорированный лист с шестиугольными отверстиями, служащий для переноса электромагнитной энергии от трансформирующих полосков в ТЕМ-рупор, откуда она излучается в открытое пространство.



а)



б)

Рисунок 15 – Диаграмма направленности на частоте 5,8 ГГц (а) и коэффициент корреляции по огибающей (б) для МЛА на основе несимметричного ТЕМ-рупора

Формируемая диаграмма направленности является веерной, что позволяет получить высокую избирательность в азимутальной плоскости, и широкий сектор покрытия в угло-местной плоскости (рисунок 15а). Кроме того, главный лепесток ориентирован немного вверх относительно горизонта, что является оптимальным для использования в системах связи БПЛА, или в других системах с приемниками и передатчиками, расположенными на разных высотах. Отметим, что данная МЛА может работать в режиме ММО (32 канала), что дает существенный выигрыш в помехоустойчивости в условиях городской застройки и пересеченной местности. Из рисунка 15б видно, что коэффициент корреляции по огибающей достигает максимального значения 0,19 на частоте 4,5 ГГц, что

свидетельствуют о низкой корреляции между лучами, а значит высокой эффективности работы антенны в многоканальной системе.

В параграфе 5.4 была разработана МЛА с полноазимутальным сканированием на основе симметричного экспоненциального ТЕМ-рупора и двухуровневой линзы с перфорированным металлическим листом и толстыми слоями диэлектрика (рисунок 16). Габаритные размеры антенны: высота 225 мм; диаметр 535 мм.

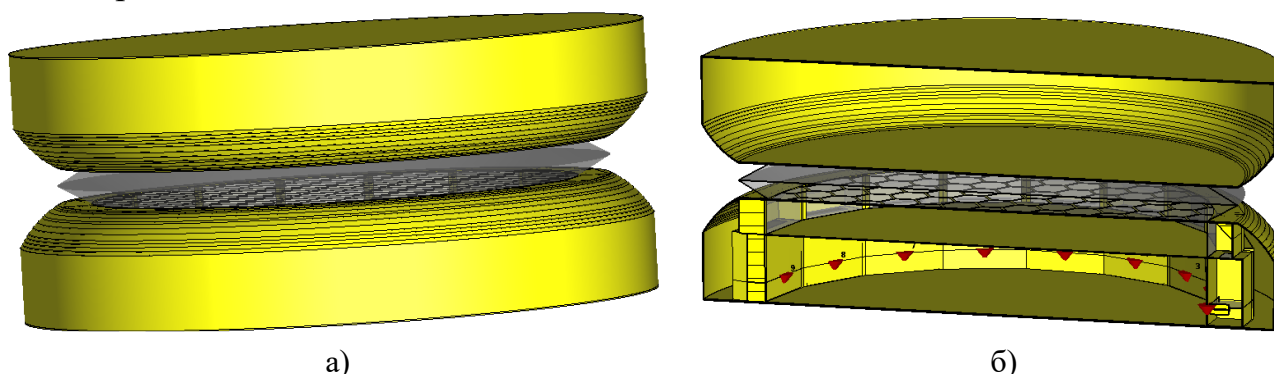


Рисунок 16 – МЛА основе двухуровневой линзы и симметричного ТЕМ-рупора: общий вид (а) и разрез (б)

Как видно из рисунка, в зазоре между образующими ТЕМ-рупора находится диэлектрическая линза с краями вытянутой формы (в разрезе в виде треугольника), предназначенная для сосредоточения излучения в узком пространственном углу. Под этой линзой находится перфорированный лист, служащий для «вытягивания» электромагнитной энергии из толстого слоя диэлектрика, куда она попадает от устройства запитки антенны, представляющего собой поворот в виде излома широкой стенки волновода, возбуждаемого с помощью цилиндрического зонда.

Результаты математического моделирования показали, что S-параметры не превышают уровень -10 дБ в диапазоне частот от 1,67 до 2,05 ГГц, при этом КПД не опускается ниже 75% в этом же диапазоне. Формируемая диаграмма направленности обладает веерной формы (ширина луча по азимуту 16° , ширина по углу места 94°), а ее ось симметрии лежит точно на горизонтальной плоскости антенны, рисунок 17.

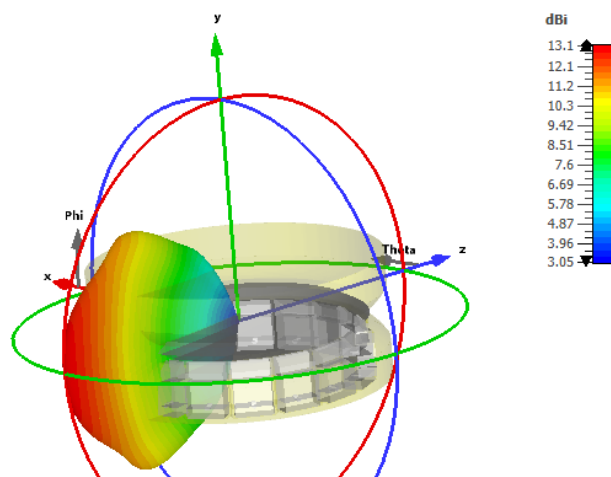


Рисунок 17 – Диаграмма направленности на частоте 1,9 ГГц

В параграфе 5.5 предложено модернизировать конструкцию двухуровневой линзы путем добавления градиента коэффициента преломления. Радиальное изменение коэффициента преломления позволяет корректировать траекторию лучей во всем теле линзы, а не только на поверхности, как это происходит в однородных линзах. За счет этого эффекта, градиентные линзы способны реализовать больший коэффициент

усиления, при меньших размерах и меньших абберациях. На основе градиентной двухуровневой линзы была разработана МЛА с антенными элементами типа несимметричная антенна Вивальди, рисунок 18.

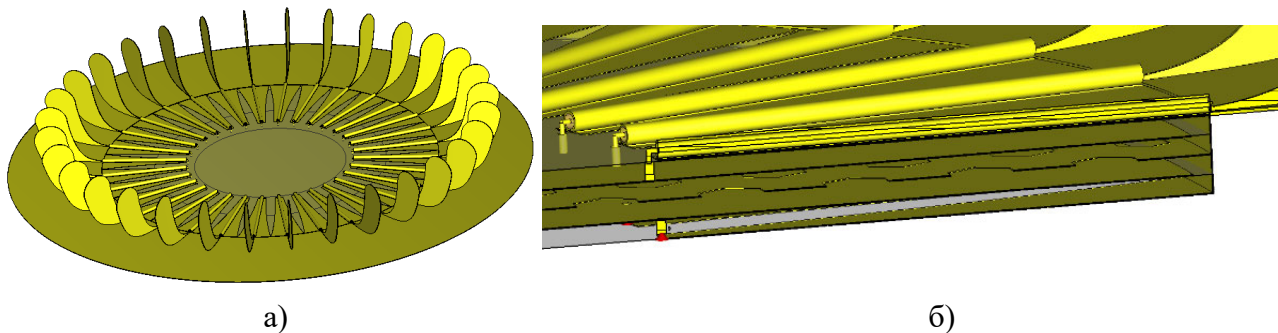


Рисунок 18–МЛА на основе градиентной двухуровневой линзы и несимметричных антенн Вивальди: общий вид (а) и разрез системы запитки (б)

Габаритные размеры разработанной конструкции: диаметр подстиляющей поверхности – 374,4 мм; высота полная – 52,5 мм. Данная антенна способна переключаться между 32 лучами в азимутальной плоскости, причем в формировании каждого луча задействованы все излучатели (из которых наиболее интенсивно возбуждены 16).

Математическое моделирование разработанной конструкции проводилось в полосе 3-6 ГГц. КПД антенны становится меньше 50% только на частотах ниже 3,8 ГГц. Главный лепесток диаграммы направленности антенны поднят над азимутальной плоскостью на угол около 60° (рисунок 19).

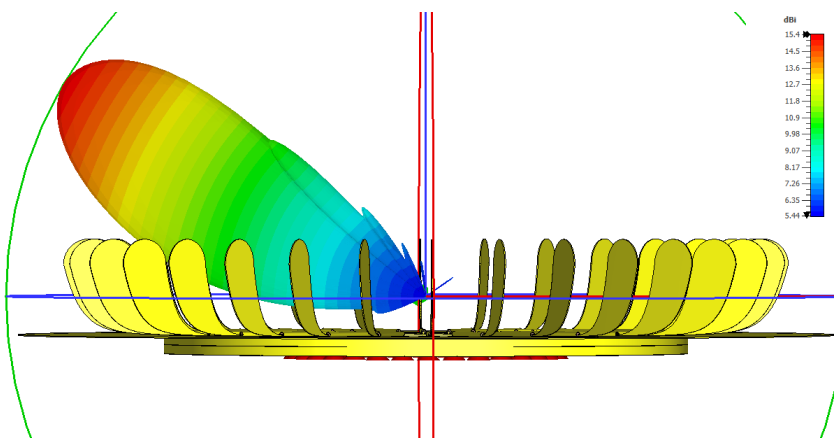


Рисунок 19 – Диаграмма направленности МЛА на основе градиентной двухуровневой линзы и несимметричных

В параграфе 5.6 была разработана полноазимутальная рефлекторная МЛА на основе поляризационно-селективного зеркала. Габаритные размеры рефлектора: диаметр 1200 мм; полная высота 800 мм. Принцип работы разработанного зеркала заключается в том, чтобы электромагнитная волна отражалась от задней, по отношению к облучателю, стенки рефлектора, и проходила сквозь стенку перед ним. Для технической реализации этого принципа, рефлектор был составлен из тонких проволочек, наклоненных на угол 45°. Облучатели также должны быть наклонены на 45° и расставлены по кругу внутри рефлектора. Характеристики диаграммы направленности на частоте 4

ГГц были следующими:
 коэффициент усиления 23 дБ;
 ширина главного лепестка $\sim 7^\circ$
 (рисунок 20).
 Передне-заднее отношение (ПЗО) принимало минимальное значение (18 дБ) на частоте 3,6 ГГц;
 максимальное значение (24 дБ) было достигнуто на 2,8 ГГц.

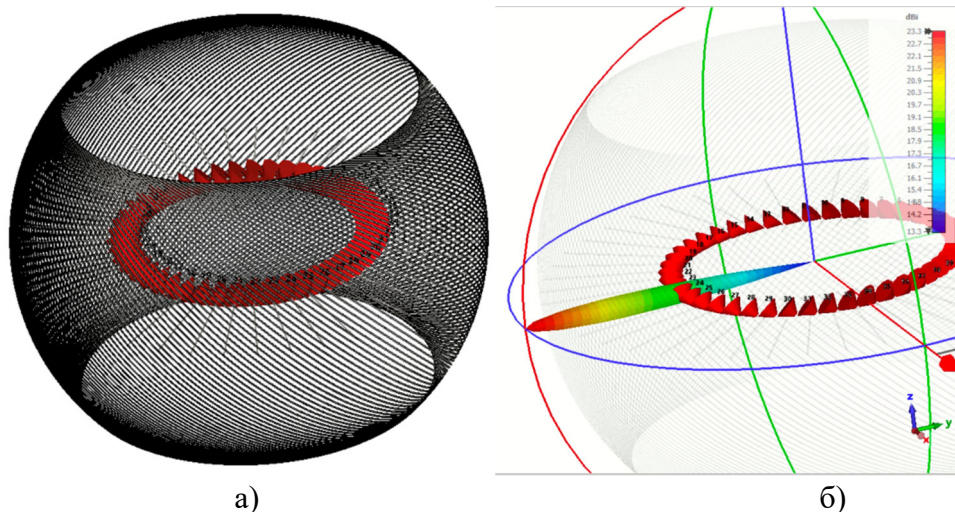


Рисунок 20 – МЛА на основе поляризационно-селективного зеркала: общий вид (а) и диаграмма направленности (б)

В параграфе 5.7 была разработана полноазимутальная МЛА на основе полусферической диэлектрической линзы, рисунок 21. По периметру линзы размещалась система облучателей (всего 18 штук). Форма облучателей может быть различной, и включать в себя как объемные, так и планарные геометрические фигуры. Проведенные исследования показали, что лучшими характеристиками обладают облучатели в виде цилиндров с малой толщиной и небольших металлических шаров.

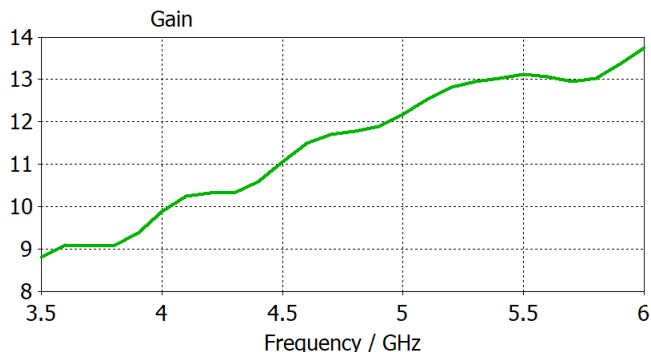
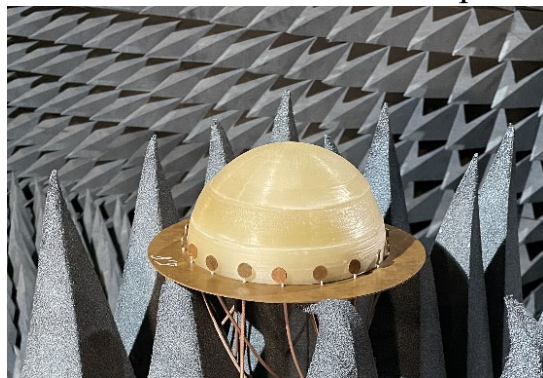


Рисунок 21 – МЛА на основе полусферической однородной линзы: общий вид (а) и расчетная частотная зависимость коэффициента усиления (б)

Проведенное математическое моделирование показало, что S-параметры МЛА не превышают уровень -10 дБ в диапазоне 4,25-6 ГГц. Формируемое антенной излучение обладает следующими параметрами: максимум диаграммы направленности расположен под небольшим углом ($\sim 9^\circ$) к азимутальной плоскости и составляет 14 дБ; уровень боковых лепестков -10,8 дБ.; ширина главного лепестка по уровню -3 дБ в азимутальной и угло-местной плоскости составила 20° и 31° , соответственно. Для верификации результатов, полученных в ходе математического моделирования, был изготовлен макет МЛА и проведены его натурные измерения в безэховой камере. Измерения подтвердили высокий уровень корреляции с расчетными результатами.

В параграфе 5.8 была разработана МЛА на основе полусферической линзы с двумя поляризациями и полноазимутальным сканированием, рисунок 22. Предлагаемая МЛА способна формировать по 32 луча в азимутальной плоскости для каждой поляризации.

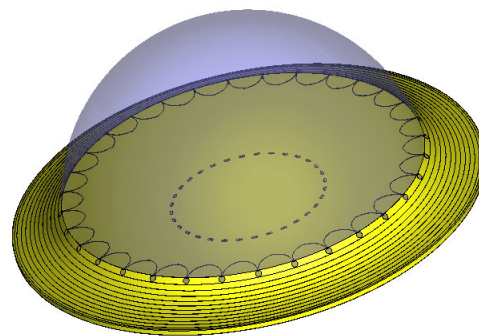


Рисунок 22 – МЛА с двумя поляризациями

В качестве облучателей с вертикальной поляризацией использовался ТЕМ-рупор, запитываемый с помощью набора экспоненциальных переходов, расположенных внизу антенны, рисунок 23. Возможность работы с горизонтальной поляризацией была реализована с помощью облучателей в виде антенн Вивальди, размещаемых на краю верхней образующей ТЕМ-рупора. Для лучшего согласования антенн Вивальди, по краю ТЕМ-рупора были проделаны отверстия, играющие роль четвертьволновой согласующей цепи.

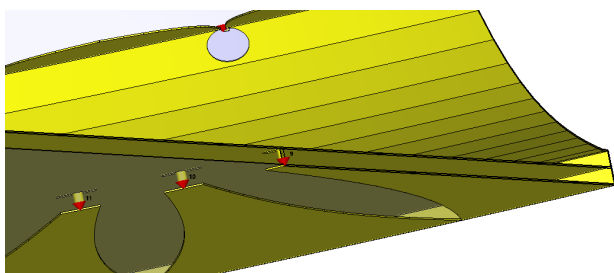


Рисунок 23 – Вертикальный разрез МЛА с двумя поляризациями (вид снизу)

Возбуждение ТЕМ-рупора происходит следующим образом: электромагнитная энергия подается на цилиндр, прикрепленный к сплошной металлической пластине, и экспоненциально расширяющийся полосок. Между горизонтальной сплошной металлической пластиной и вертикальной металлической стенкой, ограничивающей выход

электромагнитного поля наружу, есть зазор, через который волна переходит в ТЕМ- рупор из экспоненциального перехода. Далее, электромагнитная энергия, излучаемая ТЕМ-рупором, проходит через тело однородной линзы для концентрации в узком луче. Горизонтально поляризованные облучатели в виде антенн Вивальди запитываются путем непосредственного подключения к ним коаксиального кабеля.

Рассчитанные S-параметры не превышают уровень -10 дБ в полосе частот от 3 до 6 ГГц. Анализ полученных диаграмм направленности показал, что в случае горизонтальной поляризации, с ростом частоты увеличивается уровень бокового лепестка. Для борьбы с этим явлением предлагается использовать метаматериальную линзы из маленьких полосков, размещаемых в раскрыве антенн Вивальди. Добавление линзы позволило увеличить коэффициент усиления для горизонтальной поляризации на 1-1,5 дБ, рисунок 24.

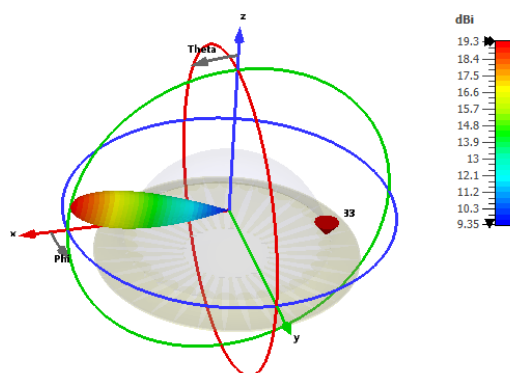


Рисунок 24 – Диаграмма направленности на частоте 3,5 ГГц

Параграф 5.9 посвящен разработке более доступных и простых решений для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры, основанных на антеннах с тороидальной и веерной диаграммой направленности. Применение подобных антенн допустимо в системах беспроводной связи с подвижными объектами, в которых возможные конфигурации расположения приемопередатчиков ограничены из-за сложившейся практики применения. В качестве примера такой системы связи рассмотрим малый БПЛА – анализ динамических изменений взаимного расположения пульта управления и БПЛА показывает, что в данной системе связи существуют неостребованные направления приема/передачи радиоволн. Такими направлениями являются непосредственно вверх (исключением является управление дроном по спутниковому каналу и прием сигнала спутниковой навигации) и вниз относительно БПЛА. Кроме того, сигналы с пульта приходят на БПЛА преимущественно в его азимутальной плоскости, с относительно небольшим разбросом по угло-местной плоскости. Причем разброс углов прихода сигнала по угло-местной плоскости уменьшается с увеличением расстояния между пультом и БПЛА (при условии отсутствия существенного увеличения высоты полета дрона). Также, БПЛА редко совершает в полете полный круг вокруг пульта – чаще он летает в секторе пирамидальной формы с вершиной в точке нахождения пульта. Исходя из данных соображений, предлагается использовать антенны с тороидальной и веерной диаграммой направленностью, позволяющих обеспечить лучшее отношение сигнал/шум за счет большего коэффициента усиления, в системах связи с ограниченным набором взаимных положений приемопередатчиков.

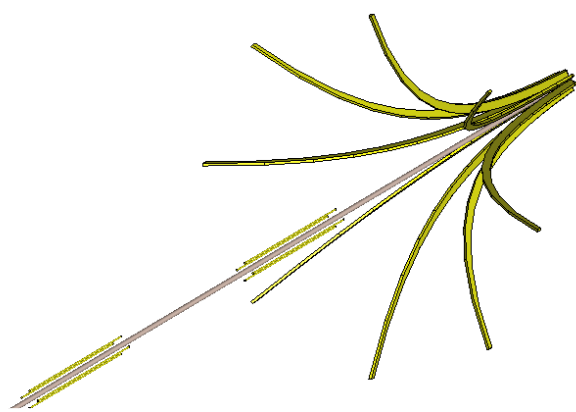


Рисунок 25 – Коллинеарная антенна на основе однопроводной линии с тороидальной диаграммой направленности

В качестве антенны с тороидальной диаграммой направленности была разработана конструкция на основе однопроводной линии передачи, возбуждаемой с помощью ТЕМ-рупора, рисунок 25. Вдоль однопроводной линии через каждую половину длины волны размещались переизлучатели, что приводило к их синфазному возбуждению и формированию узкой тороидальной диаграммы направленности.

Антенна была разработана для полосы рабочих частот 1,2-1,4 ГГц.

Параметры формируемой диаграммы направленности: коэффициент усиления меняется от 11,2 дБ до 9,3 дБ с ростом частоты; угловая ширина главного лепестка в угло-местной плоскости составила примерно 6°.

Путем добавления к предложенной конструкции дифракционной решетки и отбрасывания переизлучателей, была получена антенна с веерной диаграммой

направленности, рисунок 26. Общая длина решетки составила 1515 мм, период решетки 88 мм, ширина решетки 135 мм.

Результаты математического моделирования показали, что S-параметры не превышают значение -10 дБ, а КСВН не превышает 2 в диапазоне частот от 1,2 до 1,4 ГГц. КПД антенны не опускается ниже 88% во всем диапазоне рабочих частот, достигая максимального значения в 97% на центральной частоте. Коэффициент усиления антенны принимает значения от 12,7 до 14,3 дБ; ширина луча по уровню половинной мощности в угломестной плоскости составляет примерно 9°; ширина луча в азимутальной плоскости примерно 100°. Отметим, что главный лепесток ориентирован выше азимутальной плоскости на угол от 4° до 15° (угол увеличивается с ростом частоты).

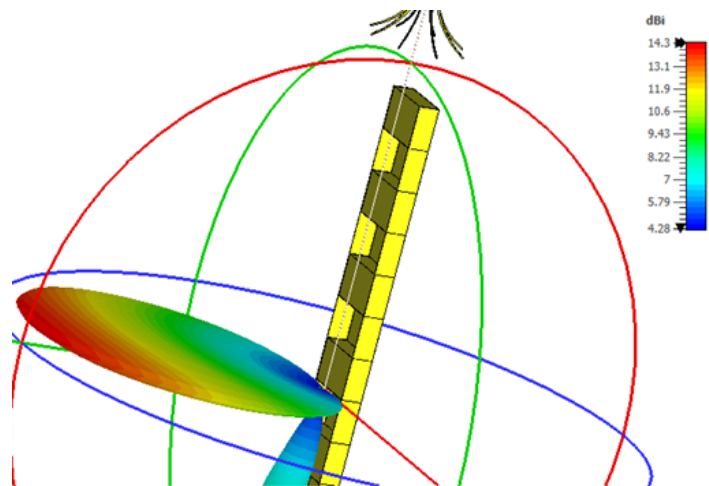


Рисунок 26 – Антенна с веерной диаграммой направленности

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертационного исследования была разработана методология проектирования реконфигурируемых антенн и МЛА, способных реализовать в многоканальных системах методы борьбы с помехами, основанные на технологиях разнесения, и с возможностью сканирования пространства высоконаправленным лучом, тем самым увеличивая отношение сигнал/шум на приемнике, а также разработаны методы на основе процедур аппроксимации поля и расчета магнитной компоненты поля, предназначенные для борьбы с искажениями ЭМП. Применение предложенных методов в совокупности и по отдельности позволяет улучшить помехоустойчивость радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

Основными результатами диссертации являются:

1. Показано, что для повышения эффективности метода 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 ИРИ в широком диапазоне частот и является наиболее универсальным, не требующим задания дополнительных параметров в отличие от ступенчатых вариантов адаптации радиуса под частоту.

2. Исследовано влияние значительных искажений структуры ЭМП в месте размещения элементов РАР 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.

3. 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.

4. 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.

5. На основе предложенного метаматериала были разработаны и исследованы конструкции рефлекторной антенны и волноводного фазовращателя. С помощью SPICE и Touchstone моделей, было исследовано влияние используемых МЭМС-переключателей и pin-диодов на рабочие характеристики и потери в управляемом метаматериале.

6. Разработанная векторная антенна в виде куба может быть реализована с помощью управляемого метаматериала, что позволит совместить в одном устройстве функцию пеленгации и радиосвязи.

7. 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 ПЗО.

8. Разработана конструкция металлодиэлектрической линзы с уменьшенными вертикальными размерами, полученными с помощью метода трансформационной оптики, на основе которой была построена МЛА с полусферическим сканированием.

9. 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.

10. Разработана МЛА на основе однородной диэлектрической линзы полусферической формы и системы облучателей, размещаемых вокруг нее. Исследованы варианты конструкции МЛА с одной и двумя линейными ортогональными поляризациями. С целью выбора оптимальных облучателей для МЛА, были исследованы различные их варианты. Результаты электродинамического моделирования были верифицированы с помощью натурный измерений в безэховой камере.

11. 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.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ:

1. Авдюшин, А.С. Использование цилиндров с анизотропным характером проводимости для упрощения модели искусственного диэлектрика / А.С. Авдюшин, А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Федоров**, В.И. Чугуевский // Радиотехника. – 2014. – № 6. – С. 100-104.

2. Авдюшин, А.С. Искусственный диэлектрик с синтезируемой поверхностью отражения электромагнитных волн СВЧ диапазона / А.С. Авдюшин, А.В. Ашихмин, И.А. Зеленин, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Федоров** // Радиотехника. – 2014. – № 6. – С. 4-7.

3. Авдюшин, А.С. Исследование плоской линзы Люнеберга с радиальными диэлектрическими лепестками / А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 5-1. – С. 23-25.

4. Авдюшин, А.С. Методика построения профиля полосков ТЕМ-рупора с линейным раскрывом на основе использования эволюционного алгоритма / А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 5-1. – С. 36-40.

5. Ашихмин, А.В. Анализ перспективных конструкций широкополосных элементов радиопеленгаторных антенных решеток / А.В. Ашихмин., Ю.Г. Пастернак, Ю.А. Рембовский, **С.М. Фёдоров** // Антенны. – 2015. – № 7 (218). – С. 46-62.

6. Авдюшин, А.С. Моделирование линз Люнеберга в полосковом исполнении / А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 79-83.

7. Калинин, Ю.Е. Анализ перспективных направлений проектирования сверхширокополосных антенн на основе линзы Люнеберга / Ю.Е. Калинин, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 6. – С. 87-88.

8. Ашихмин, А.В. Кольцевая антенная решетка из симметричных вибраторов с резистивными нагрузками в разрывах плеч / А.В. Ашихмин, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ю.А. Рембовский, А.В. Ситников, **С.М. Федоров** // Радиотехника. – 2018. – № 7. – С. 57-59.
9. Ашихмин, А.В. Антенная решетка для полноазимутального пеленгования источников радиоизлучения с произвольной поляризацией / А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, К.А. Разинкин, Е.А. Рогозин, Ю.А. Рембовский, **С.М. Федоров** // Радиотехника. – 2018. – № 7. – С. 60-65.
10. Антипов, С.А. Плоская линза Люнеберга, составленная из диэлектриков трапецеидальной формы, с возможностью полноазимутального сканирования / С.А. Антипов, А.В. Володько, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Федоров** // Радиотехника. – 2018. – № 7. – С. 66-69.
11. Чугуевский, В.И. Синтез кольцевой антенной решетки с распределительной системой на радиальном волноводе для информационных сетей стандарта 5G / В.И. Чугуевский, Ю.Е. Калинин, Ю.Г. Пастернак, П.В. Николаев, В.Н. Кострова, **С.М. Федоров** // Радиотехника. – 2018. – № 7. – С. 70-75.
12. Чугуевский, В.И. Широкополосный планарный излучатель с волноводным питанием для антенных решеток систем спутниковой связи информационных сетей стандарта 5G / В.И. Чугуевский, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Федоров** // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 1. – С. 73-77.
13. Ашихмин, А.В. Улучшение разрешения двух источников с помощью формирования "виртуальной" антенной решетки / А.В. Ашихмин, П.В. Першин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 3. – С. 64-69.
14. Ашихмин, А.В. Пеленгование с использованием модели, в которой наблюдаемое поле является суперпозицией плоской падающей волны и рассеянных сферических волн, создаваемых блестящими точками на корпусе рассеивателя / А.В. Ашихмин, П.В. Першин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 3. – С. 70-76.
15. Быков, К.А. Сферическая линза Люнеберга на основе печатных плат с электрически малыми рассеивателями / К.А. Быков, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 78-83.
16. 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.
17. 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.

18. Макаров, О.Ю. Влияние дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Люнеберга / О.Ю. Макаров, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, Е.А. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – № 6 (12). – С. 42-48.
19. Пастернак, Ю.Г. Анализ влияния дисперсии метаматериалов в цилиндрической линзе Люнеберга с вынесенным фокусом / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2020. – Т. 23. – № 4. – С. 48-55.
20. Пастернак, Ю.Г. Синтез и анализ одной цилиндрической линзы, построенной на основе параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 4. – С. 83-90.
21. Ищенко, Е.А. Исследование влияния интегрированного в конструкцию пирамидального рупора метаматериала на диаграмму направленности / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, М.А. Сиваш, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 5. – С. 107-113.
22. Пастернак, Ю.Г. Исследование направленных и частотных свойств линзы Люнеберга, реализованной с использованием свойств трансформационной оптики / Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, **С.М. Фёдоров**, Е.А. Ищенко // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 1. – С. 100-106.
23. Пастернак, Ю.Г. Исследование сферической линзы Люнеберга, состоящей из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, Е.А. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Антенны. – 2021. – № 6 (274). – С. 13-22.
24. Пастернак, Ю.Г. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Ищенко, В.А. Пендюрин, **С.М. Фёдоров** // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 54-62.
25. Пастернак, Ю.Г. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, **С.М. Фёдоров** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24. – № 1. – С. 32-38.
26. Болкунов, А.А. Пастернак, Ю.Г. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров / А.А. Болкунов, Л.А. Овчаренко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, И.В. Попов, Ф.С. Сафонов, **С.М. Фёдоров** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24. – № 2. – С. 79-87.
27. Ищенко, Е.А. Полуволновой диполь с активным рефлектором на основе оптоуправляемого метаматериала / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17. – № 4. – С. 71-80.

28. **Фёдоров, С.М.** Использование оптоуправляемого электромагнитного кристалла в роли активного рефлектора / **С.М. Фёдоров**, Е.А. Ищенко, В.А. Пендюрин, К.А. Бердников, И.А. Баранников // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 1. – С. 85-89.
29. Пастернак, Ю.Г. Формирование дополнительных виртуальных каналов приема путем интерполяции и экстраполяции сигналов, принятых линейной антенной решеткой / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 3. – С. 51-66.
30. Пастернак, Ю.Г. Векторная антенная система и метод измерения угловых координат источников радиоизлучения с произвольной поляризацией, базирующийся на формировании виртуальной антенной решетки из магнитных элементов / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 3. – С. 67-76.
31. Пастернак, Ю.Г. Перспективные многолучевые антенные системы полноазимутального и полусферического обзора для мобильных телефонов / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2021. – № 4. – С. 66-72.
32. Пастернак, Ю.Г. Анализ современных способов и средств технической реализации линзы Люнеберга / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, **С.М. Федоров** // Антенны. – 2022. – № 2 (276). – С. 53-62.
33. 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.
34. Ищенко, Е.А. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Фёдоров**, И.А. Черноиваненко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – № 3. – С. 90-94.
35. Пастернак, Ю.Г. Фазированная антенная решетка из сегментно-параболических антенн для мобильного терминала спутниковой связи и метод формирования виртуальных каналов приема сигналов / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, К.С. Сафонов, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2022. – № 3. – С. 65-75.
36. Ищенко, Е.А. Сравнение эффективности формирования виртуальных антенных решеток на основе функции Ганкеля и магнитных диполей для геометрически сложных целей / Е.А. Ищенко, В.В. Негроров, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Федоров** // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2023. – Т. 28. – № 5. – С. 74-82.
37. 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.

38. **Фёдоров, С.М.** Исследование влияния фильтрующих конденсаторов на рабочие характеристики управляемого метаматериала / **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. – № 4. – С. 111-114.
39. Ищенко, Е.А. Отражательный волноводный фазовращатель на основе метаматериала / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 1. – С. 78-81.
40. Пастернак, Ю.Г. Обоснование актуальности создания оптоуправляемых рефлекторов для многофункциональных антенных систем / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Фёдоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 3. – С. 12-19.
41. Ищенко, Е.А. Использование активного метаматериала для формирования сканирующей антенны / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Н.Б. Смольянов, **С.М. Фёдоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 3. – С. 71-75.
42. Пастернак, Ю.Г. Разработка и исследование объемной линзы Люнеберга в виде совокупности ячеек кубической формы с металлическими рассеивателями / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Фёдоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 3. – С. 76-80.
43. Пастернак, Ю.Г. Многолучевая антенна из однородной линзы на основе метаматериальных ячеек / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Фёдоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 4. – С. 68-72.
44. Ищенко, Е.А. Многолучевая антенна на основе полусферической линзы с системой облучателей для полноазимутального сканирования / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Фёдоров** // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 4. – С. 159-166.
45. 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.
46. Ищенко, Е.А. Многолучевая антенна на основе ТЕМ-рупоров с полноазимутальным сканированием / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Федоров** // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 1. – С. 55-62.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:

47. Avdushin, A.S. Vivaldi antenna with printed lens in aperture / A.S. Avdushin, A.V. Ashikhmin, V.V. Negrobov, Yu.G. Pasternak, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2014. – Vol. 56. – № 2. – P. 369-371.

48. Makarov, E.S. Broadband double-dipole microstrip antenna with symmetrical corner-fed and planar antenna array on its basis / E.S. Makarov, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2017. – Vol. 59. – № 2. – P. 229-232.

49. Ashikhmin, A.V. Ultra-wideband electric vibrator with high directional properties / A.V. Ashikhmin, Y.A. Rembovskiy, A.V. Negrobov, V.V. Negrobov, Y.G. Pasternak, P.V. Pershin, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2017. – Vol. 59. – № 9. – P. 2227-2229.

50. Pasternak, Yu.G. Three-centimeter wave band antenna with controlled polarization based on reflective grating / Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, **S.M. Fedorov**, O.I. Sherstyuk // Microwave and optical technology letters. – 2017. – Vol. 59. – № 11. – P. 2862-2864.

51. Ashikhmin, A.V. Quasi-fractal antenna system based on asymmetric TEM-horns nested into each other / A.V. Ashikhmin, A.V. Negrobov, Y.G. Pasternak, P.V. Pershin, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2018. – Vol. 60. – № 2. – P. 322-324.

52. Pasternak, Yu.G. Patch array with distribution system based on radial waveguide / Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, **S.M. Fedorov**, V.I. Chuguevskiy // Microwave and optical technology letters. – 2018. – Vol. 60. – № 5. – P. 1115-1118.

53. Ashikhmin, A.V. Study of field distortions introduced by antenna array mobile carrier body / A.V. Ashikhmin, Y.A. Rembovsky, Y.G. Pasternak, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2018. – Vol. 60. – № 9. – P. 2250-2252.

54. Ashikhmin, A.V. Irregular TEM-horn with lens made of an artificial dielectric / A.V. Ashikhmin, P.V. Pershin, Y.A. Rembovsky, K.A. Bykov, Y.G. Pasternak, **S.M. Fedorov** // Microwave and optical technology letters. – 2019. – Vol. 61. – № 5. – P. 1371-1374.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. Ishchenko, E.A. Tunable electromagnetic metallic wire crystal for reconfigurable antennas and phase shifters / E.A. Ishchenko, Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // 2021 Photonics and electromagnetics research symposium, PIERS. – 2021. – P. 712-720.
59. Ishchenko, E.A. Applying virtual antenna array technology to minimize DOA errors / E.A. Ishchenko, Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // Antenna design and measurement international conference, ADMInC. – 2021. – P. 68-70.
60. Ishchenko, E.A. Waveguide phase shifter based on controlled metamaterial / E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, E.A. Rogozin., **S.M. Fedorov** // International conference "Applied mathematics, computational science and mechanics: current problems" (AMCSM). – 2021. – P. 1902 012066.
61. Ishchenko, E.A. Integration of decoupling capacitors in the structure of controlled metamaterial / E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // International conference "Applied mathematics, computational science and mechanics: current problems" (AMCSM). – 2021. – P. 1902 012067.
62. Ishchenko, E.A. New active reflector antenna made of computer-controlled metamaterial / E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // Computer applications for management and sustainable development of production and industry (CMSD). – 2022. – P. 12251.
63. Pasternak, Y.G. Compact multi-beam antennas for full-azimuth and hemispherical scan coverage / Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // 2022 Photonics and electromagnetics research symposium (PIERS). – 2022. – P. 337-341.
64. 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.
65. Ishchenko, E.A. Application of virtual antenna arrays technology to minimize the influence of soil characteristics on the direction-finding quality / E.A. Ishchenko, O.Y. Makarov, Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // International conference "Applied mathematics, computational science and mechanics: current problems" (AMCSM). – 2023. – P. 1-4.
66. Ishchenko, E.A. Noise stability assessment of virtual magnetic dipoles when placed on a UAV / E.A. Ishchenko, Y.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, **S.M. Fedorov** // International conference on electrical engineering and photonics, EExPolytech. – 2023. – P. 14-17.

Патенты и свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ:

67. 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.

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618330 Российская Федерация. Программа расчета уровня сигнала с учетом дифракции на одиночном препятствии: № 2018615518: заявл. 30.05.2018: опубл. 11.07.2018 / **С.М. Фёдоров**, В.В. Глотов; заявитель ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет". – 1 с.

69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618333 Российская Федерация. Программа расчета зон приема сигнала с учетом помеховой обстановки: № 2018615513: заявл. 30.05.2018: опубл. 11.07.2018 / **С.М. Фёдоров**, В.В. Глотов; заявитель ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет". – 1 с.

70. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660046 Российская Федерация. Программа расчета ослабления сигнала на трассе с учетом характера застройки: № 2019614713: заявл. 26.04.2019: опубл. 30.07.2019 / **С.М. Фёдоров**, В.В. Глотов; заявитель ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет". – 1 с.

71. 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.

72. 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.

Монографии:

73. Ашихмин, А.В. Проектирование сверхширокополосных линзовых антенн: монография / А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, **С.М. Федоров**. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 171 с.

74. Ищенко, Е.А. Исследование перспективных направлений применения опто-управляемых метаматериалов в антеннах и СВЧ-устройствах [Электронный ресурс] / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Федоров**. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023. – 1 электрон, опт. диск (CD-ROM)

75. Баранников, И.А. Разработка и исследование многолучевых антенн на основе поляризационно-селективного зеркала и диэлектрической линзы: монография [Электронный ресурс] / И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, **С.М. Федоров**. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024. – 1 электрон, опт. диск (CD-ROM)

Фёдоров Сергей Михайлович

Автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук

Синтез многолучевых антенных систем с физическими и виртуальными элементами для улучшения помехоустойчивости радиоэлектронной аппаратуры

Подписано в печать 26.06.2025

Формат 60x84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 2.3 Тираж 100 экз. Заказ № 166.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84