

На правах рукописи



ИЩЕНКО Евгений Алексеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕНН С ЧАСТОТНЫМ
СКАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ
ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Фёдоров Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, доцент 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), ФГКВОУ 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), ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

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

Защита состоится «12» марта 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03 в конференц-зале ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

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

Автореферат разослан «12» января 2026 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 24.2.286.03,
д.т.н., профессор



Белецкая Светлана Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение антенн с возможностью отклонения главного лепестка становится все более актуальным в современных комплексах радиолокации и обнаружения малых высокомобильных комплексов, как беспилотные летательные аппараты. При этом использование фазовращателей приводит к значительному удорожанию конструкций антенн, а также к снижению надежностей конструкций антенных решеток. В таких условиях особый интерес вызывают конструкции, которые позволяют отклонить главный лепесток антенны без использования систем фазовращателей, чем обеспечивается сканирование антенной пространства.

В настоящее время особенно актуальной является задача реализации систем обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Одними из наиболее важных частей таких систем являются антенны, способные формировать узкий главный лепесток, который может быть использован для сканирования пространства. При этом разработчики стремятся достичь минимизации стоимости и повышения надежности таких антенных систем, что требует отказа от активных компонентов, как фазовращатели и поворотных устройств. Поэтому совершенствование антенн радиолокационных систем является важной и актуальной задачей, а использование частотного сканирования позволяет повысить надежность конструкции, а также обеспечить снижение стоимости производства компонентов систем радиолокации.

При реализации антенных систем обнаружения БПЛА следует обеспечивать наиболее высокую точность сканирования в азимутальной плоскости, что позволяет реализовывать антенны с веерными диаграммами направленности, способными отклонять лепесток в азимутальной плоскости при выполнении частотного сканирования. Антенные системы с двухкоординатным сканированием могут быть реализованы путем объединения частотного и электронного сканирования, которое обеспечивается путем использования многопортовых систем диаграммообразования. Подобные антенные системы позволяют обеспечивать пространственное сканирование в двух плоскостях без использования фазовращателей.

Научно-техническая задача проектирования антенных систем аппаратуры обнаружения малых БПЛА усложняется следующими факторами:

- обеспечение оптимальных размеров антенной системы при выборе метода реализации частотного сканирования;
- выбор места расположения антенной системы и системы радиолокации – наземное или воздушное базирование на БПЛА;
- выбор оптимальных диапазонов частот реализации антенных систем для обнаружения БПЛА на основе их картин диаграмм обратного рассеяния и зависимости уровня ЭПР от частоты;
- выбор оптимальных систем диаграммообразования для обеспечения питания антенной системы, построенной на основе антенной решетки из антенных элементов с возможностями частотного сканирования.

Степень разработанности темы. Несмотря на большое число отечественных и зарубежных научных работ в области теории и техники антенных систем с возможностью отклонения главного лепестка в пространстве (А.В. Ашихмин, Ю.Б. Нечаев,

А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, Г.К. Усков, Е.Г. Хрипунов, О.И. Ястребцова, С. Benkalfate, B. Bib, A. Boag, N.M. Boskovic, B. Chen, J.-H. Chou, D. Coppens, R. Dilli, M.M. Elnaby, K. Encino, P. Gardner, S. Gao, J. Geng, G. Gong, C. Han, D. Harini, H.L. Hirsch, J. Huang, A.H. Hussein, M.T. Islam, B. Ji, Y. Jia, B. Khawaja, O. Kilic, W.-Y. Li, J.-W. Lian, Y.-Y. Lin, H. Liu, J. Liu, Y. Liu, J. Lu, R.J. Mailloux, A. Maltsev, C. Mangenot, C. Marshall, R.K. Miranda, S.S. Naik, A.D. Nesic, M.T. de Oliveira, A. Ouslimani, A. Pudseyev, M. Rajabalian, X. Ren, A. Reyna, V.K. Saxena, V. Singh, M. Soleimani, G. Toso, M.C. Viganó, D. Wei, L. Wen, J. Wu, Y. Xiang, G. Yang, Q. Yang, Q. Xue, K.-N. Yung, Y. Xiao, Y. Zhang и др.), многие важные аспекты проектирования антенных систем с возможностью частотного отклонения главного лепестка остаются недостаточно исследованными:

- разработка и исследование антенных систем с возможностью частотного сканирования с высоким коэффициентом направленного действия на основе отражательной дифракционной решетки амплитудного типа;
- разработка и исследование антенных систем с возможностью широкоугольного частотного сканирования и узким главным лепестком на основе отражательных дифракционных решеток рельефно-фазового типа (эшелетт);
- разработка и исследование конструкций системы диаграммообразования и питания антенных решеток, позволяющих реализовать комбинированное сканирование – частотное и коммутационное на основе делителей мощности и линзовых (аплантической и Люнеберга) схем диаграммообразования;
- разработка и исследование антенны с полноазимутальным комбинированным сканированием с помощью системы диаграммообразования на основе линзы Люнеберга и антенных элементов на основе дифракционной решетки эшелетт, что позволяет обеспечить широкоугольное двухкоординатное сканирование.

Объектом исследования являются антенные системы с одно- и двухкоординатным частотным сканированием на основе отражательных дифракционных решеток.

Предметом исследования являются антенны с частотным сканированием, построенные на основе дифракционных отражательных решеток, а также диаграммообразующих схем, реализующих двухкоординатное комбинированное сканирование (частотное и коммутационное).

Целью работы является разработка и исследование антенных систем с частотным сканированием для радиолокаторов, использование которых позволит упростить и повысить надежность антенных систем с возможностью отклонения главного лепестка в пространстве без применения фазовращателей и активных радиокомпонентов. Для реализации рассматриваются конструкции на основе дифракционных отражательных решеток, спиральных волноводов, а также систем диаграммообразования на основе линзованных систем для отклонения лепестка в двух плоскостях.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач**:

- исследования и разработки конструкции антенной системы с частотным сканированием на основе амплитудной дифракционной решетки для формирования узконаправленной всерной диаграммы направленности для радиолокатора наземного базирования;

- исследования и разработки антенной системы с частотным сканированием на основе рельефно-фазовой отражательной дифракционной решетки, формирующая высоконаправленное излучение, для бортового радиолокатора;
- исследование влияния коэффициента замедления на угол дифракции электромагнитных волн основных порядков при реализации антенн на основе однопроводных линий с возможностью частотного сканирования;
- исследования возможности реализации комбинированного сканирования для антенных систем с частотным сканированием путем добавления в конструкцию диаграммообразующей схемы, обеспечивающей коммутационное сканирование в ортогональной плоскости;
- проведение экспериментальных исследований антенн с частотным сканированием для верификации расчетных характеристик согласования, диаграммы направленности и углов частотного сканирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана методика построения антенной системы на основе амплитудной дифракционной решетки, учитывающая эффект замедления электромагнитных волн в области между дифракционной решеткой и однопроводными линиями. Определено влияние основных характеристик дифракционной решетки на уровень коэффициента направленного действия, угол отклонения луча, коэффициента полезного действия, коэффициента связи между решеткой и однопроводной линией;
- разработана методика построения антенной системы на основе рельефно-фазовых дифракционных решеток (типа эшелетт), обладающая возможностью широкоугольного частотного сканирования, реализуемой с помощью двухпортовой однопроводной линии. Получены характеристики взаимного влияния однопроводной линии и дифракционной решетки, а также определены предельные углы сканирования. Выявлены зависимости коэффициента направленного действия антенны от числа антенных элементов, выбрана оптимальная конструкция используемой однопроводной линии;
- разработана методика построения антенны с комбинированным сканированием, сочетающего частотный и коммутационный способы управления диаграммы направленности. Предложена конструкция диаграммообразующей схемы на основе апланатической линзы и линзы Люнеберга, реализующая широкоугольное коммутационное сканирование.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методик построения антенных систем с частотным сканированием на основе дифракционных решеток отражательного типа. Выведены выражения расчета углов отклонения луча антенны при частотном сканировании с учетом возникающей области замедления между линией возбуждения и дифракционной отражательной решеткой.

Практическая значимость работы заключается в разработке и создании антенных систем для радиолокаторов бортового и наземного базирования, реализующих сканирование пространства без использования сосредоточенных элементов и фазовращателей. Использование диаграммообразующих схем на основе линз позволило реализовать двухкоординатное сканирование, сочетающее коммутационное и частотное управление диаграммой направленности.

Методы исследования. В работе использовались методы анализа и синтеза антенн, методы математического моделирования, вычислительные методы технической электродинамики и стандартные методики натурных экспериментальных исследований антенных устройств.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- установлено, что антенна с частотным сканированием может быть построена на основе амплитудной отражательной дифракционной решетки. Показано возникновение области замедления электромагнитных волн, находящейся между однопроводной линией и дифракционной решеткой, и оказывающей влияние на точность расчета углов сканирования антенной системы. Выяснено, что введение в конструкцию антенны угла атаки (наклона) однопроводной линии над дифракционной решеткой позволяет повысить уровень коэффициента направленных действия. Разработана методика получения ортогонального излучения на целевой частоте путем изменения основных параметров антенной системы;

- установлено, что на основе отражательной рельефно-фазовой дифракционной решетки возможно построить антенную систему с частотным сканированием. Установлено, что система питания для такой антенны может быть реализована в виде двухпортовых (двухсторонних) однопроводных линий, что обеспечивает удвоение сектора частотного сканирования. Показано, что для питания антенной системы на основе дифракционной рельефно-фазовой решетки могут быть применены диско-стержневые линии, а также линии в виде решетки эшелетт. Показана зависимость характеристик антенной системы от расстояния между однопроводной линией и дифракционной решеткой, выявлено возникновение области замедления волн между линией питания и дифракционной решеткой;

- выяснено, что в роли антенного элемента для антенных решеток с частотным сканированием может выступать система на основе спирального волновода. Показано, что использование диаграммообразующей схемы на основе апланатической линзы позволяет построить антенную систему с комбинированным двухкоординатным сканированием – частотным и коммутационным;

- показано, что антенная система, построенная на основе дифракционной решетки рельефно-фазового типа и диаграммообразующей схемы на основе двухслойной линзы Люнебегера позволяет реализовать широкоугольное двухкоординатное комбинированное сканирование – в азимутальной плоскости путем коммутации входов диаграммообразующей схемы, а в угло-местной плоскости с помощью управления частотой. Разработанная антенна формирует узконаправленный луч, обеспечивающий высокое разрешение при сканировании окружающего пространства.

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. Для выполнения расчетов использовались специализированные системы автоматизированного проектирования – PTC MathCAD, Autodesk Inventor 2025, DS CST Studio Suite 2025. 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. В качестве инструментальных средств при проведении натурных испытаний использовалось поверенное измерительное оборудование компаний Rohde&Schwarz и АКИП. При производстве компонентов макетов антенн использовалось специализированное аддитивное оборудование Picaso 3D Designer XL Series 2, Bambu Lab X1 Carbon Combo.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях: Progress in Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou, (г. Ханчжоу, 2021, IEEE), 2021 Antenna Design and Measurement International Conference, ADMINC 2021 (г. Санкт-Петербург, 2021, IEEE); 2 Международная конференция «Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry» (CMSD-II-2022, г. Душанбе, Таджикистан); XXX международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2024); XXXI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2025); 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ (г. Воронеж, 2025).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены в АО НПП «Автоматизированные системы связи», АО НКТБ «Феррит». Также, результаты работы внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ», дисциплина «Устройства СВЧ и антенны»

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

- 1) государственное задание № FZGM-2024-0003 по созданию молодежной лаборатории «Помехоустойчивых систем связи и управления наземными и воздушными беспилотными роботизированными аппаратами»;
- 2) государственное задание № FZGM-2023-0011 «Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего функциональность беспилотных летательных аппаратов малого радиуса действия»;
- 3) государственное задание № FZGM-2024-0006 «Разработка и исследование принципов создания системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов с использованием аэромобильных антенных систем».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах, из них 13 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 работ опубликовано в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных Web of Science и Scopus, 5 работ опубликовано в сборниках трудов международных научно-технических конференций, получен 1 патент на полезную модель, получены 3 свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в получении основных результатов, изложенных в диссертации. В процессе анализа конструкций БПЛА и отражающих поверхностей особое внимание уделялось методам электродинамического моделирования для выбора оптимальных способов расчета дифракции и отражения волн [1, 2, 29]. Исследовались возникающие искажения электромагнитного поля в ближней зоне рассеяния

волн, что важно при выборе наиболее защищенных от помех мест размещения антенн комплексов радиолокации и пеленгации [3, 6, 7, 8, 14, 15, 16]. Были рассмотрены особенности влияния атмосферы на БПЛА и объекты воздушного базирования [4]. В работах [11, 12, 13, 22, 25] автором предлагаются конструкции антенн с частотным сканированием, описаны базовые методики реализации частотного сканирования на основе дифракционных решеток рельефно-фазового типа (эшелетт), предлагаются конструкции антенных систем радиолокаторов с высоконаправленным главным лепестком, что позволяет использовать предлагаемые решения для обнаружения малых высокоомобильных роботизированных комплексов. Так как антенны с частотным сканированием должны обладать широким диапазоном рабочих частот, то были рассмотрены возможности реализации широкополосных антенн на основе печатной технологии [26]. В работах [5, 9, 10, 13, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 27] выполнялся анализ наиболее распространенных диаграммообразующих схем. Проводилось исследование направленное на оптимизацию процесса изготовления разработанных антенных систем с использованием аддитивных технологий [6, 21, 28].

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует 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.», 3 «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами», 9 «Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения» паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 166 страницах, содержит 71 рисунок и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора.

В первой главе выполнялся анализ современного состояния и перспектив развития антенных систем с возможностью управления диаграммой направленности антенны. Выполнен анализ основных методов реализации сканирования – использование фазовращателей (построение фазированных антенных решеток), применение многопортовых антенных систем, применение линзовых систем, использование сосредоточенных элементов в конструкции антенных систем, применение механического сканирования, а также использование частотного сканирования. На основании анализа современных тенденций были сделаны выводы об основных методах сканирования, выделены особенности использования частотного сканирования, как наиболее перспективного и эффективного метода управления диаграммой направленности. Были сформулированы основные задачи, решение которых позволит получить

конструкции антенн с улучшенными характеристиками, что и является целью диссертации.

Во второй главе показана перспективность реализации антенн с частотным сканированием на основе дифракционных решеток, которые могут быть использованы в задачах обнаружения малых роботизированных комплексов, а также при реализации высоконаправленных помехозащищенных систем связи:

1. Разработана методика построения антенн с частотным сканированием на основе дифракционной решетки. Проведен анализ конструкций дифракционных решеток, выбор оптимальных размеров периода решетки, а также способы их использования в роли отражающих структур для антенн с частотным сканированием.

2. Исследован вопрос выбора оптимальных рабочих частот для реализации антенн с частотным сканированием для обнаружения малых высокомобильных роботизированных комплексов, а также выбора оптимальных рабочих частот антенной системы, предназначенной для установки на малом носителе, с учетом минимизации искажений характеристик поля.

3. Разработана и исследована конструкция антенны с частотным сканированием на основе амплитудной дифракционной решетки. Проведен анализ влияния ее конструктивных особенностей на характеристики излучения, согласования, управление диаграммой направленности.

4. Разработана и исследована конструкция антенны с частотным сканированием на основе фазовой отражательной дифракционной решетки. Исследована возможность создания антенны с двухкоординатным сканированием на основе фазовой дифракционной решетки.

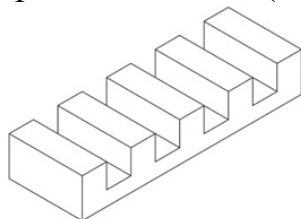
5. Проведено исследование и моделирование систем питания для антенн с частотным сканированием на основе дифракционных решеток. Выполнен анализ гибридных методов моделирования с автоматизированной передачей результатов между задачами моделирования для оптимизации процессов расчета.

Первым этапом исследования было рассмотрение математического описания процесса дифракции электромагнитных волн на дифракционных решетках. Базовым математическим выражением для описания всех дифракционных решеток является условие Брэгга-Вульфа, которое имеет вид:

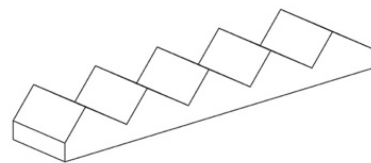
$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где n – порядок дифракции (1, 2, 3...); λ – длина волны; d – период дифракционной решетки; θ – угол дифракции.

В ходе исследования рассматривались отражательные решетки амплитудного и рельефно-фазового типов (эшелетт), которые приводятся на Рисунке 1.



а) Амплитудная отражательная



б) Рельефно-фазовая отражательная

Рисунок 1 – Виды дифракционных решеток

С учетом особенностей условия Брэгга-Вульфа и конструкции решеток мы можем записать следующие выражения:

1) для амплитудной:

$$n\lambda = 2d \cdot [\sin(\theta_m) + \sin(\theta_i)] \quad (2)$$

2) для рельефно-фазовой – угол блеска:

$$n\lambda = \xi \sin(-2\gamma) \quad (3)$$

Из данных выражений, явно следует зависимость направления луча от частоты, что и позволяет реализовывать антенны с частотным сканированием на основе эффекта дифракции волн на отражательных решетках. Выполнив анализ основных характеристик дифракционных решеток с помощью методов электродинамического моделирования, было выяснено, что при построении антенных систем с частотным сканированием на основе дифракционных решеток следует придерживаться следующих правил:

1) Период дифракционной решетки должен быть равен длине волны на частоте Брэгговского резонанса – нормального излучения;

2) Глубина пазов должна быть выбрана от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ длины волны, но для улучшения согласования, а также управления связью излучателя и дифракционной решеткой может быть увеличена;

3) Дифракционная решетка на основе рельефно-фазовой отражательной структуры обладает высокой эффективностью фокусирования дифрагированной энергии, однако она более сложна в реализации и расчете ее конструктивных параметров, так как ее характеристики сильно зависят от точности изготовления при настройке угла блеска;

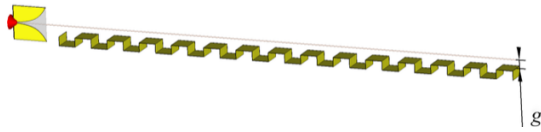
4) Амплитудная отражательная решетка более проста в реализации, так как ее характеристики в первую очередь определяются длиной штрихов, но в такой системе подавление дифракции высших порядков значительно менее эффективно.

На основании приведенного анализа дифракционных решеток выполнялось исследование конструкций антенн на основе амплитудной и рельефно-фазовой отражательных дифракционных решеток. Рассмотрение начиналось с выбора рабочей полосы частот антенны с учетом целей ее использования. В нашем случае, антенны предполагалось использовать в роли радиолокационных систем для обнаружения малых БПЛА. Было выполнено электродинамическое моделирование зависимостей эффективных площадей рассеяния для пяти различных БПЛА. Полученные результаты показали, что оптимальным выбором для наземного радиолокатора будет диапазон S (2.4 ГГц), а для бортового – X (10 ГГц), при этом стоит учитывать, что для антенн с возможностью частотного сканирования необходимо обеспечивать достаточно широкую полосу рабочих частот.

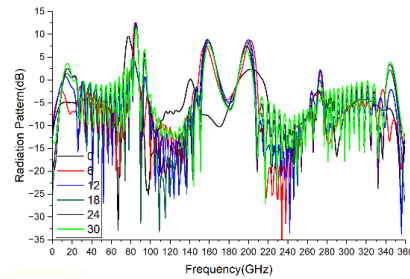
В роли базовой конструкции антенной системы на основе амплитудной отражательной дифракционной решетки была использована однопроводная линия Губо, которая размещалась над дифракционной решеткой. На Рисунке 2 приводится вид одного антенного элемента; его основные характеристики: период решетки 125 мм, полная длина антенны 1926 мм, глубина штриха 33 мм.

В процессе анализа было выяснено, что оптимальные характеристики антенны достигаются при расстоянии между линией и решеткой равным 12 мм, выявлено, что

рассчитанное ожидаемое значение нормального излучения на частоте 2.4 сместилось к области 2.2-2.3 ГГц.



а) Вид антенного элемента



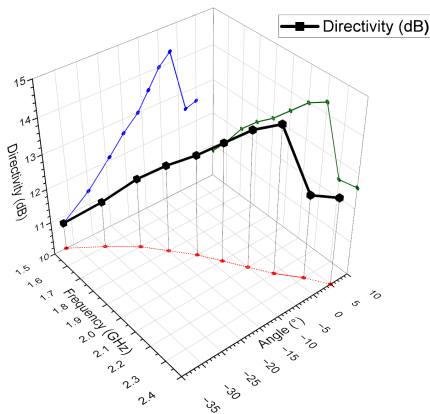
б) Зависимость диаграммы направленности от расстояния g

Рисунок 2 – Конструкция одной линии антенного элемента с частотным сканированием

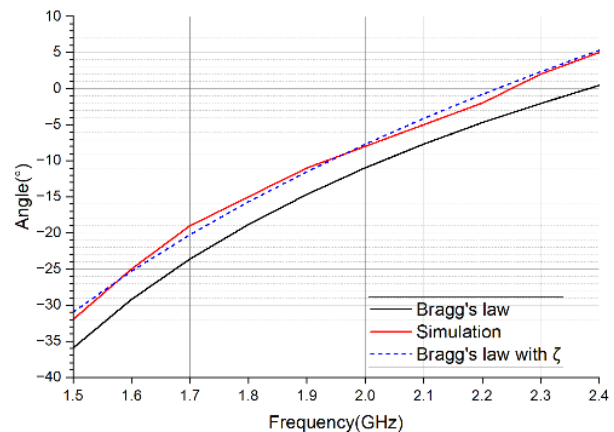
Для анализа данного эффекта рассмотрим кривые зависимости углов сканирования, полученные путем расчетов на основании условия Брэгга и результатов моделирования. Приведем формулу дифракции с данным коэффициентом замедления (ζ):

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\zeta} - \frac{n\lambda}{2d} \quad (4)$$

С учетом этого выражения, на Рисунке 3 приводится сравнение расчетов углов дифракции для базового выражения и нового, учитывающего коэффициент замедления, а также график сканирующего куба, полученного для одной однопроводной линии с расстоянием равным 12 мм.



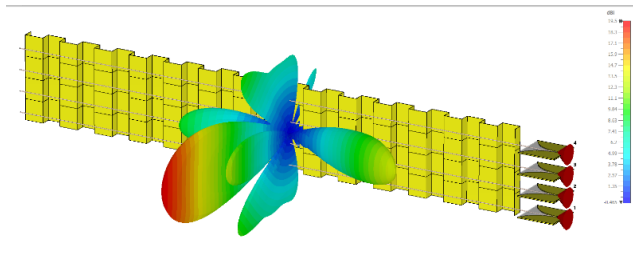
а) график сканирующего куба



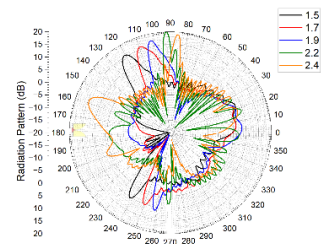
б) зависимость угла сканирования от частоты ($\zeta=1.754$)

Рисунок 3 – Характеристики одного антенного элемента

Результаты математического моделирования показали, что антенна обеспечивает выполнение частотного сканирования в широком секторе углов, КПД антенны держится на уровне более 90%, однако использование только одного антенного элемента вызвало большой уровень заднего лепестка. На основании этого, было принято решение о формировании антенной решетки из нескольких антенных элементов (АЭ). Было выяснено, что оптимальным является случай, когда используется четыре антенных элемента (Рисунок 4).



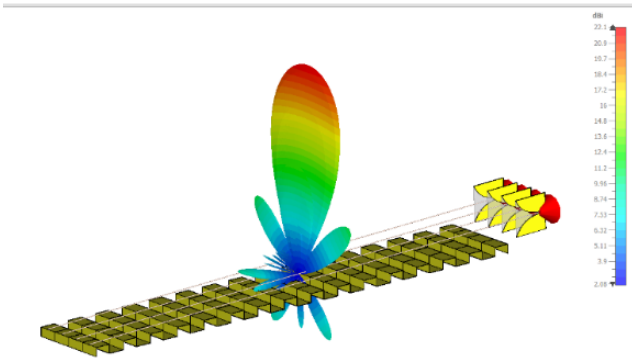
а) трехмерная диаграмма направленности на частоте 2.4 ГГц, 4 АЭ



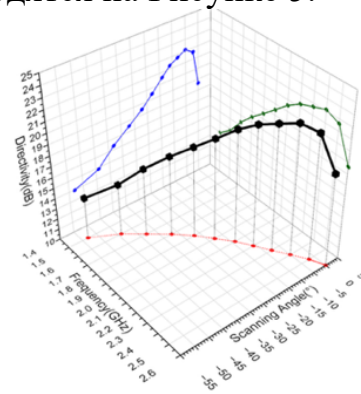
б) диаграммы направленности в полярных координатах

Рисунок 4 – Направленные свойства антенной системы с частотным сканированием из 4 АЭ

Разработанная антенна обладает высоким КНД и возможностью частотного сканирования, однако параллельная линия питания создает межпортовую связь на уровне -20 дБ (S_{21}). Для антенн бегущей волны оптимальным считается значение -10 дБ. Моделирование показало, что для достижения этого необходимо уменьшить период дифракционной решетки до 55 мм и задать угол наклона однопроводной линии над решеткой. С учетом модификаций была сформирована антенная решетка из четырех линий, рабочие характеристики которой приводятся на Рисунке 5.



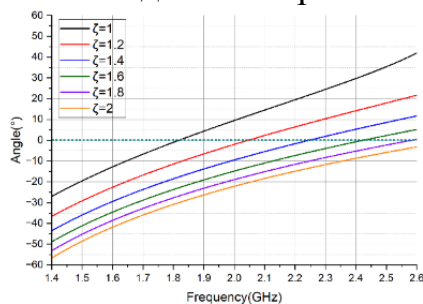
а) трехмерная диаграмма направленности на частоте 2.4 ГГц, 4 АЭ



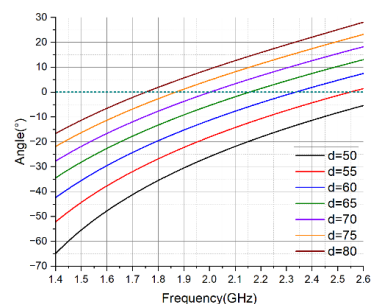
б) сканирующий куб антенны из 4 АЭ

Рисунок 5 – Характеристики модифицированной антенны с углом атаки 2° и штрихом 55 мм

Разработанная антенна обеспечивает лучшие характеристики по уровню КНД, общим показателям эффективности, а также по ширине главного лепестка. Проанализировав выражение (4) можно заметить, что достижение целевого направления излучения возможно путем варьирования двух основных параметров – длины штриха и коэффициента замедления. На Рисунке 6 приводится семейство кривых, которые показывают, как зависит угол сканирования от частоты при изменении коэффициента замедления или длины штриха.



а) изменение коэффициента замедления



б) изменение длины штриха

Рисунок 6 – Зависимость характеристик углов сканирования от параметров антенны

С учетом этого было выяснено, что ортогональное излучение достигается при угле атаки в 0.1° (длина штриха 55 мм, $\zeta=1.538$) или при установке длины штриха в 60 мм (угол атаки 1.1°). Проведенные исследования показали, что изменение штриха позволяет быстрее изменить углы отклонения луча, однако применение регулировки коэффициента замедления приводит к получению более оптимальных характеристик антенны – более стабильный уровень КНД и УБЛ. Представленная антенна на основе амплитудной отражательной дифракционной решетки предназначена для реализации радиолокатора наземного базирования.

Антенная система радиолокатора бортового базирования была сформирована на основе рельефно-фазовой дифракционной решетки эшелетт. Для реализации был выбран диапазон рабочих частот 8-11 ГГц. В роли системы питания были предложены две системы – диско-стержневая (Рисунок 7) и эшелетт. Возбуждение в обоих случаях выполнялось с использованием двух пирамидальных рупорных антенн, что позволило удвоить угол частотного сканирования путем переключения места возбуждения антенны.

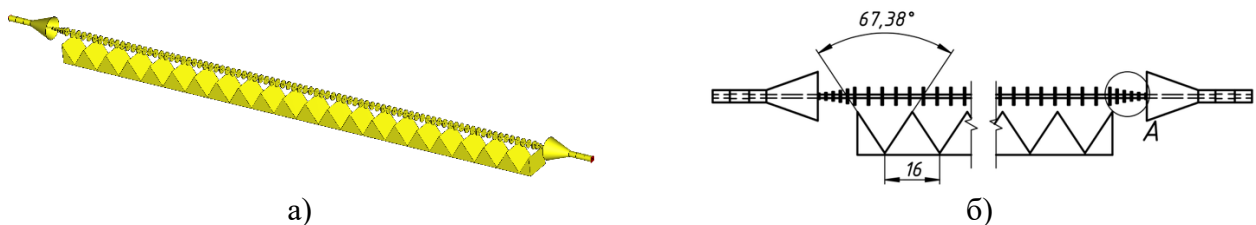


Рисунок 7 – Антенна с дифракционной решеткой эшелетт и диско-стержневой линией питания

Для достижения оптимальных характеристик излучения, так же требовалось обеспечить связь между концом и началом линии в -10 дБ (S_{21} -параметр). Достижение данного значения стало возможным при расстоянии между решеткой и линией возбуждения в 4 мм. В таком случае, на частоте 10 ГГц, один антенный элемент обеспечивает уровень КНД в 12.7 дБ. Для одного антенного элемента основные характеристики приводятся на Рисунке 8.

Разработанная антенна на основе диско-стержневой однопроводной линии питания обеспечивает частотное сканирование в полосе от 8 до 11.6 ГГц. При этом, использование двухпортовой однопроводной линии обеспечивает сканирование в секторе $\pm 68^\circ$ или 136° . График сканирующего куба показывает, что в нижней части диапазона рабочих частот происходит более быстрое изменение угла сканирования, при этом при приближении к высоким частотам шаг уменьшается до $1-2^\circ$. КПД антенны во всем диапазоне частот не падает ниже -2 дБ, а УБЛ не увеличивался более -7 дБ, что позволяет эффективно использовать такую антенну в роли радиолокационной. При ортогональном излучении, антенна обладает шириной главного лепестка $4.2^\circ \times 160^\circ$.

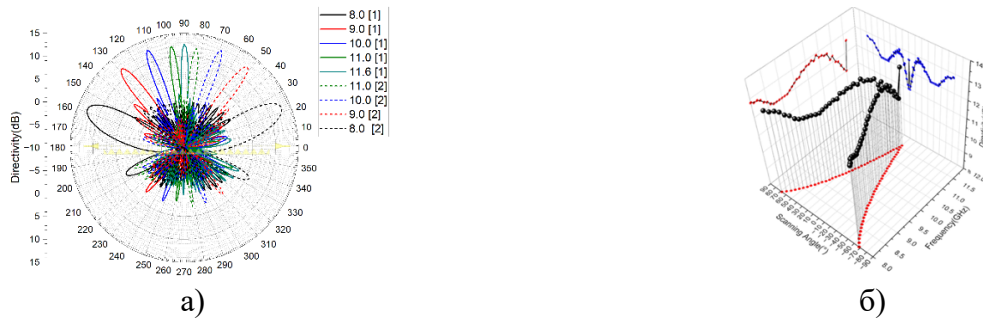


Рисунок 8 – Характеристики одного антенного элемента диско-стержневой эшелетт: а) диаграммы направленности (пунктир – переключение порта); б) сканирующий куб

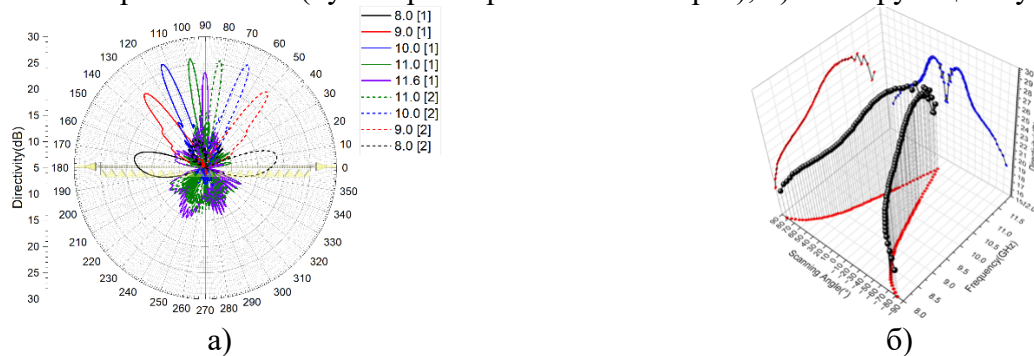


Рисунок 9 – Характеристики АР диско-стержневой эшелетт: а) диаграммы направленности (пунктир – переключение порта); б) сканирующий куб

В процессе анализа было выяснено, что оптимальные характеристики достигаются при использовании антенной решетки из десяти антенных элементов. Характеристики такой антенны приводятся на Рисунке 9. Антенная решетка из 10 однопроводных линий обеспечивает эффективное частотное сканирование в секторе $\pm 81^\circ$ с учетом сканирования двумя портами. Однако, ввиду особенностей работы дифракционной решетки эшелетт, возникает ослепление в области близкой к ортогональному излучению. Полученная антенна имеет размеры 336×160 мм (размер дифракционной решетки). Стоит отметить, что данная антенная решетки обладает лучом узким сразу в двух плоскостях: в азимутальной и угломестной, при ортогональном излучении ширина лепестка составляет $3.7^\circ \times 8.3^\circ$ (частотное сканирование осуществляется только в азимутальной плоскости; расшифровка обозначения – «азимутальная плоскость» x «угломестная»); при этом, на начальном участке сканирования (8 ГГц) лепесток наиболее широкий ($23.5 \times 13.6^\circ$). Таким образом, полученная антенна обеспечивает высокую эффективность и направленность, что позволяет ее эффективно применять в роли антенной системы радиолокатора. Рассмотрим конструкцию с системой питания на основе линии эшелетт, как это показано на Рисунке 10.

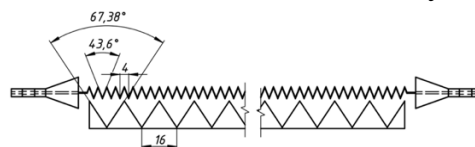
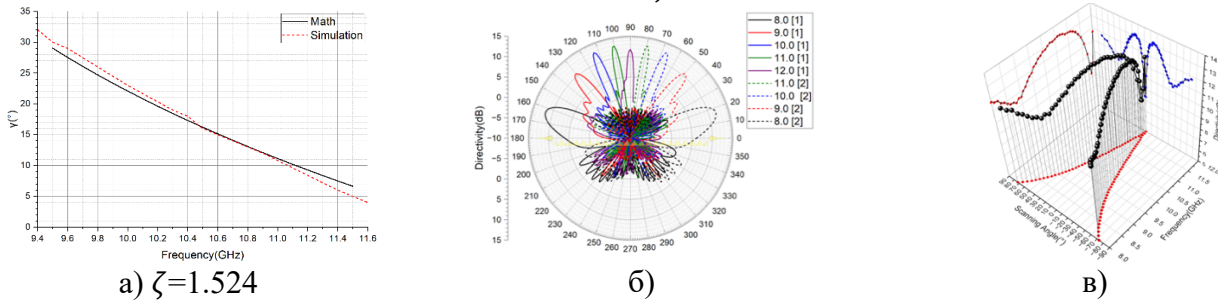


Рисунок 10 – Конструкция антенны эшелетт-эшелетт

Наиболее оптимальным расстоянием между однопроводной линией и дифракционной решеткой, обеспечивающим лучший коэффициент связи, является 3.75 мм. В конструкции рассматриваемой антенной системы также возникает эффект

замедления волны, поэтому значения углов дифракции будут определяться в соответствии с выражением (5). Основные характеристики антенны из одной однопроводной линии приводятся на Рисунке 11.

$$\sin(\gamma) = \frac{1}{\zeta} + \frac{n\lambda}{d} \quad (5)$$



а) $\zeta=1.524$

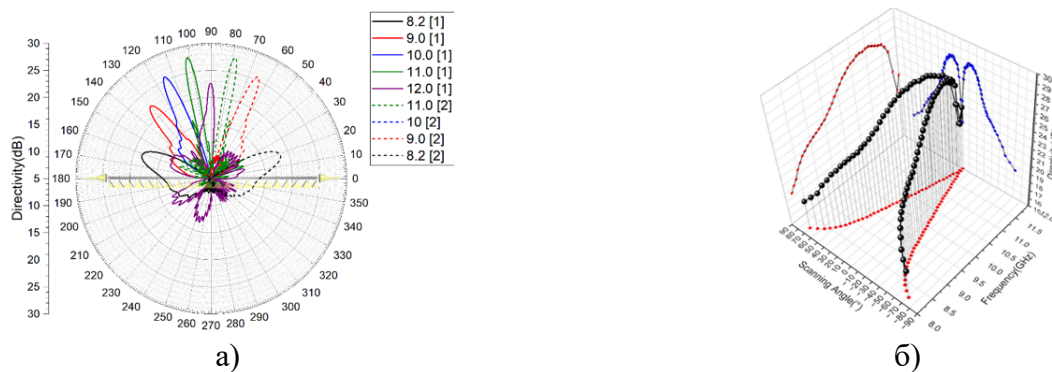
б)

в)

Рисунок 11 – Характеристики одного антенного элемента эшелетт-эшелетт: а) сравнение расчетного значения угла сканирования и результатов моделирования; б) диаграммы направленности при частотном сканировании; в) сканирующий куб

Полученные результаты показывают, что использование схемы эшелетт-эшелетт обеспечивает сканирование одним антенным элементом в секторе $\pm 73^\circ$, при этом крайнее положение луча соответствует частоте 8 ГГц, а ортогональное излучение достигается на частоте 12 ГГц. После достижения ортогонального излучения антенна переключается на второй порт, чем и достигается полный сектор сканирования. Применение схемы эшелетт-эшелетт позволило расширить угол сканирования по сравнению с диско-стержневой линией на 10° суммарного сектора (146° против 136°). График сканирующего куба также показывает наличие ослепления антенны при приближении к ортогональному излучению, что также обосновано особенностями работы рельефно-фазовых решеток эшелетт.

На основании приведенной антенны была сформирована антенная решетка из десяти линий (наиболее оптимальные характеристики и баланс уровня КНД/число элементов). На Рисунке 12 приводится вид характеристик антенной системы из десяти линий.



а)

б)

Рисунок 12 – Характеристики антенны радиолокатора с частотным сканированием при использовании решетки из 10 линий: а) срез частотного сканирования; б) сканирующий куб

Антенна на основе 10 линий типа эшелетт-эшелетт обеспечивает частотное сканирование в секторе $\pm 71^\circ$ с минимальным КНД 18.4 дБ. Наблюдается эффект ослепления решетки в зоне ортогонального излучения, характерный для рельефно-фазовых структур. Конструкция поддерживает гибридное двухкоординатное сканирование при комбинации с диаграммообразующей системой на основе апланатической линзы,

обеспечивая электронное и частотное управление лучом. Виды диаграмм направленности при использовании коммутационного сканирования приводятся на Рисунке 13.

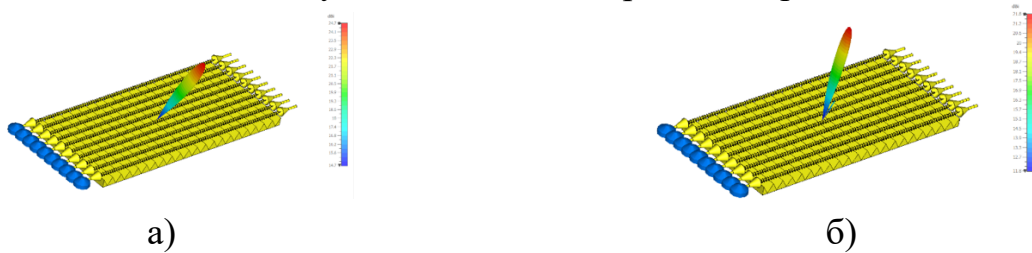


Рисунок 13 – Моделирование антенны с системой диаграммообразования: а), б) трехмерные диаграммы направленности

Полученные графики показывают, что применение апланатической линзы позволило обеспечить отклонение лепестка антенны на $\pm 33^\circ$ в угломестной плоскости, при этом антенна сохранила способность выполнения частотного сканирования в диапазоне 8.2-12 ГГц.

Третья глава посвящена исследованию антенных систем с гибридным сканированием на основе совмещения частотного – антенной и электронного – на основе использования диаграммообразующего устройства.

Первой рассматриваемой и предложенной конструкцией является плоская антенна на основе спиральных волноводов, которая возбуждается с использованием апланатической линзы – Рисунок 14.

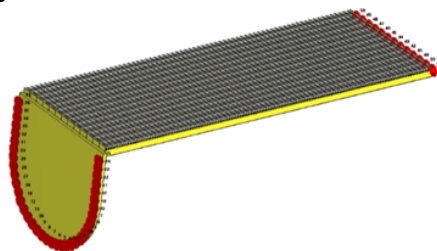


Рисунок 14 – Антенная система с двухкоординатным сканированием

Данная антенная система состоит из апланатической линзы с 13 портами и диэлектрической антенны-нагрузки. Питание подается на один из входных портов линзы, которая возбуждает группу выходных портов, подключенных к спиральному излучателю. Излучающая структура формируется на основе полистироловой трубки, вокруг которой обвивается спираль с внутренним диаметром 10 мм, а полный размер излучателя составляет 602.5 на 208 мм. На спираль крепится полистирольная пластина с линией директоров. Конструкция обеспечивает высоконаправленное и эффективное излучение, не используя металлических волноводов, а её диэлектрические компоненты могут быть изготовлены аддитивным методом. В процессе анализа частотного сканирования будет запрашиваться центральный вход апланатической линзы (в данном случае 7 порт). Характеристики частотного сканирования приводятся на Рисунке 15а, б; использование электронного сканирования – Рисунок 15в.

антеннами Вивальди, что создает гибридную систему с возможностью электронного и частотного сканирования. На Рисунке 17 приводятся основные характеристики, полученные в результате моделирования антенной системы.

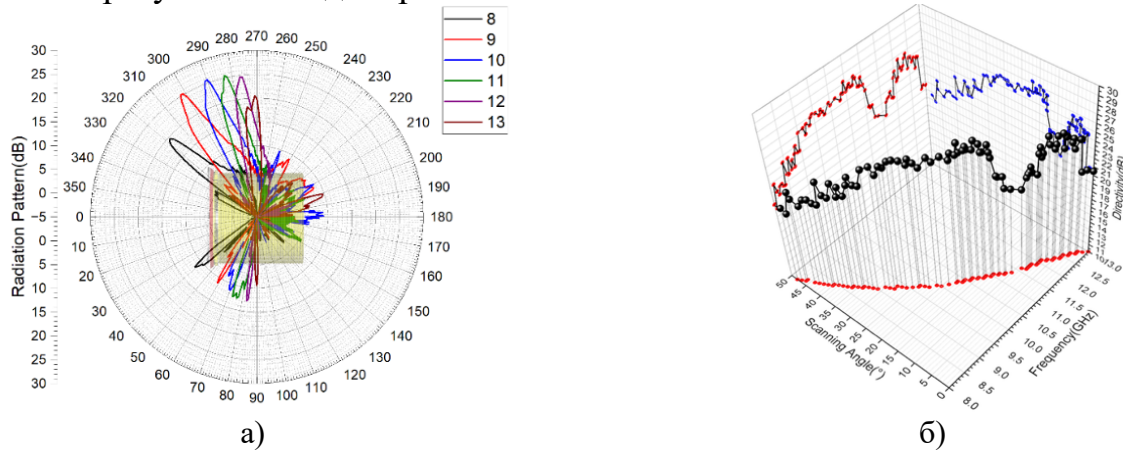


Рисунок 17 – Характеристики антенны при выполнении частотного сканирования: а) демонстрация частотного сканирования антенной; б) сканирующий куб

Антенна с гибридным сканированием обеспечивает электронное азимутальное и частотное угломестное сканирование в секторе 48° . Достигнута малая ширина диаграммы направленности $3.9 \times 5.7^\circ$ (ортогональное излучение) и уровень боковых лепестков ниже -7 дБ. Конструкция на основе линзы Люнеберга реализует полноазимутальное электронное и секторальное частотное сканирование.

Четвертая глава посвящена экспериментальным измерениям макета антенны с частотным сканированием на основе амплитудной дифракционной отражательной решетки. В процессе изготовления макета широко применялись аддитивные технологии, поэтому также выполнено исследование влияния материалов такого производства на распространяющиеся волны. Процедура измерений была разделена на ряд этапов:

1) Юстировка антенной системы, так как требовалось обеспечить ортогональное излучение на частоте 2.4 ГГц. Для достижения этого изменялся угол атаки однопроводных линий над дифракционной решеткой.

2) Измерение характеристик согласования антенны и корреляция с результатами моделирования. Результаты приводятся на Рисунке 18. Полученные характеристики максимально близки к результатам моделирования.

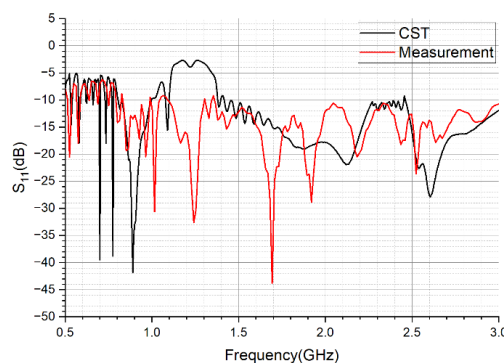


Рисунок 18 – Измерение характеристик согласования макета антенны

3) Третьим этапом измерялась диаграмма направленности (ДН) на частоте 2.4 ГГц. Результаты приводятся на Рисунке 19.

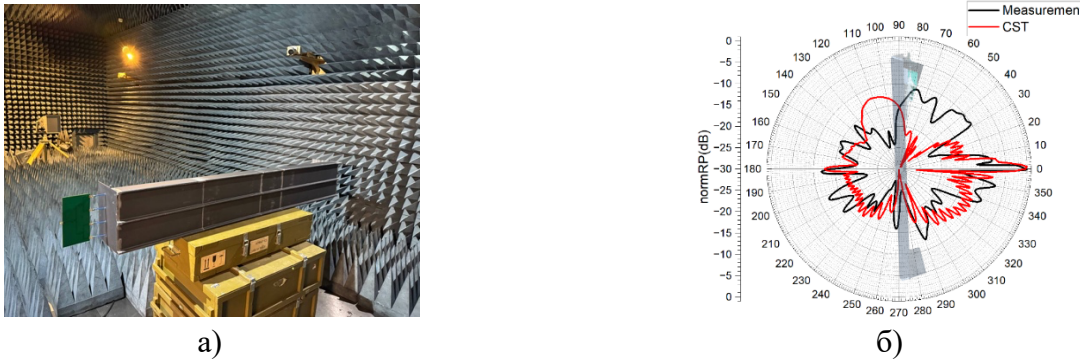


Рисунок 19 – Измерение характеристик диаграмм направленности антенны

4) Заключительным этапом экспериментальных измерений была оценка частотного сканирования, реализуемого антенной. Для каждой частоты выполнялось 10 измерений, поэтому на графике результатов измерений существуют отклонения от единой точки, которые могут быть вызваны погрешностью позиционирования при измерениях – Рисунок 20.

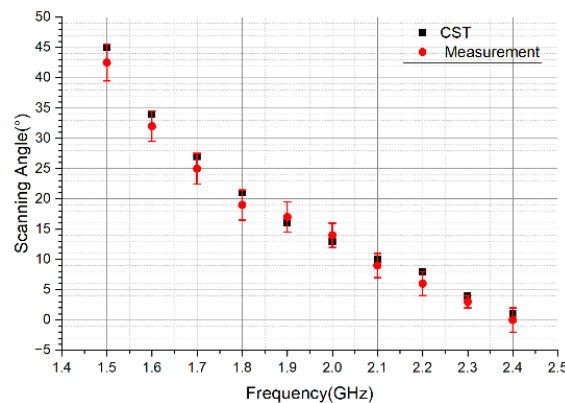


Рисунок 20 – Измерение характеристик частотного сканирования антенной

Полученные результаты показывают, что разработанная антенна позволяет осуществить частотное сканирование, при этом нахождение пика излучения не отличается от значений моделирования на уровень более чем 2.5° , при этом ошибка увеличивается при максимальном отклонении лепестка от ортогонального излучения на частоте 1500 МГц.

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертации были разработаны и исследованы конструкции антенн с частотным сканированием, предназначенных для использования в радиолокаторах для обнаружения малых высокомобильных роботизированных комплексов. Разработанные антенны построены на основе принципов дифракции электромагнитных волн на отражательных решетках. Особенности предлагаемых конструкций является простота реализации, во многом заключающаяся в возможности управления диаграммой направленности без использования фазовращателей.

Основными результатами диссертации являются:

1. Разработана конструкция антенной системы на основе амплитудной отражательной дифракционной решетки с возможностью частотного сканирования. В качестве источников возбуждения использовались однопроводные длинные линии. Были

исследованы основные характеристики представленной антенной системы, а также выбраны оптимальные конструкционные параметры для достижения максимальных рабочих характеристик антенны. Разработаны методики реализации направленного излучения на целевой частоте путем варьирования параметров самой дифракционной решетки, и расстояния между ней и однопроводной линией. Выявлен эффект возникновения области замедления волн в разработанной антенной системе, а также исследовано влияние данного эффекта на углы сканирования волн.

2. Разработаны и исследованы конструкции антенн на основе дифракционной отражательной рельефно-фазовой решетки эшелетт. Были получены основные характеристики антенны, продемонстрированы возможности реализации однопроводных линий на основе диско-стержневой структуры и линии эшелетт. Оценено влияние коэффициента замедления на формируемую диаграмму направленности.

3. Проведены исследования антенных систем с частотным сканированием, включающих в себя диаграммообразующие схемы на основе апланатической линзы и двухслойной линзы Люнеберга. Разработанные антенны обладают возможностью комбинированного сканирования с использованием диаграммообразующей схемы. В этом случае, антенна обеспечивает частотное сканирование на основе своей конструкции, а коммутационное на основе диаграммообразующей схемы. Данные конструкции легли в основу разработанных антенных систем с широкоугольным сканированием.

4. Были проведены экспериментальные исследования макета антенны с частотным сканированием на основе амплитудной отражательной дифракционной решетки. В процессе изготовления широко использовались аддитивные технологии, поэтому было проведено исследование влияния аддитивных материалов на рабочие характеристики антенны. Для макета антенны был разработан и изготовлен делитель мощности на основе схемы Уилкинсона. В ходе экспериментального исследования были измерены и верифицированы основные характеристики – согласование, диаграмма направленности, углы частотного сканирования.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации автор видит в улучшении характеристик разработанных диаграммообразующих схем, повышению направленных свойств антенн, оптимизации конструкции антенн с целью уменьшения эффекта ослепления антенн при ортогональном излучении. Применение разработанных конструкций позволяет реализовать высокоэффективные, дешевые и надежные антенные системы для обнаружения высокомобильных роботизированных комплексов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Володько А. В. Применение компьютерных методов моделирования эффективной площади рассеяния / А. В. Володько, А. Р. Гаврилов, М. О. Енговатов, **Е. А. Ищенко**, Н. Б. Смольянов, С. М. Фёдоров // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 2. – С. 47–53. – EDN GJRFSB.

2. **Ищенко Е. А.** Применение технологий электродинамического моделирования для определения эффективной площади рассеяния малых объектов // Моделирование систем и процессов. – 2024. – № 4. – С. 53–59.

3. **Ищенко Е. А.** Реализация высокоомобильного комплекса пеленгации для БПЛА с применением виртуальных магнитных диполей / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, С. М. Фёдоров, И. А. Баранников // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 48–61.
4. Ахияров В. В. Оценка параметров атмосферной турбулентности для стандартной модели атмосферы / В. В. Ахияров, **Е. А. Ищенко** // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 12. – DOI: 10.30898/1684-1719.2024.12.20. – EDN STCOUL.
5. Проскурин Д. К. Реализация диаграммообразующего устройства на основе апланатической линзы для реализации сканирующей антенной системы радиолокатора / Д. К. Проскурин, Ю. Г. Пастернак, С. М. Фёдоров, **Е. А. Ищенко**, А. Е. Медведев // Вестник НовГУ. – 2025. – Т. 1 (139). – С. 44–54.
6. **Ищенко Е. А.**, Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Федоров С. М. Оценка устойчивости пеленгации виртуальными магнитными диполями при использовании диэлектрически непрозрачного обтекателя радиопеленгатора // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 7. – С. 50–54.
7. **Ищенко Е. А.**, Негробов В. В., Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Федоров С. М. Исследование ограничений, накладываемых на возможности методов формирования «виртуальных» антенных решеток, в условиях значительного искажения структуры электромагнитного поля вблизи приемной антенной решетки // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 68–78.
8. **Ищенко Е. А.**, Негробов В. В., Пастернак Ю. Г., Пендюрин В. А., Федоров С. М. Исследование методов формирования виртуальных антенных решеток в условиях сильного искажения структуры электромагнитного поля вблизи приемной антенной решетки // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 74–82.
9. Черноиваненко И. А. Разработка двухдиапазонного широкополосного делителя мощности Уилкинсона / И. А. Черноиваненко, **Е. А. Ищенко**, А. В. Останков, С. М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 5. – С. 101–105.
10. Шершов Д. А. Исследование современных антенных систем на основе линз Ротмана / Д. А. Шершов, С. М. Фёдоров, **Е. А. Ищенко** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 4. – С. 120–124.
11. **Ищенко Е. А.** Антенная система радиолокационного комплекса на основе антенн Вивальди и однопроводных линий / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, С. М. Фёдоров, В. А. Щедрин // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 4. – С. 65–70. – EDN HBSSTE.
12. **Ищенко Е. А.** Антенная система для реализации помехозащищенной связи с возможностью частотного сканирования / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин, С. М. Фёдоров, А. Е. Медведев // Техника радиосвязи. – 2025. – Выпуск 2 (65). – С. 53–59.
13. **Ищенко Е. А.** Кольцевая антенная система на основе плоской линзы Люнеберга с частотным сканированием в угломестной плоскости / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, С. М. Фёдоров, А. А. Шеверев, В. А. Щедрин // Теория и техника радиосвязи. – 2025. – № 1. – С. 69–75. – EDN KOKFRI.

Статьи, опубликованные в изданиях, цитируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus:

14. **Ishchenko E. A.** Using virtual antenna array technology to analyze the electromagnetic environment / **E. A. Ishchenko**, Yu. G. Pasternak, V. A. Penduyrin, S. M. Fedorov // Proc. SPIE 12564, 2nd International Conference on Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD-II-2022). – 2023.

15. Ashikhmin A. V., Pershin P. V., **Ishchenko E. A.**, Pasternak Yu. G., Sivash M.A., Fedorov S.M. 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 // Proceedings – 2020 7th All-Russian Microwave Conference, RMC 2020 : 7, Moscow, 25–27 November 2020. – Moscow, 2020. – P. 111–114.

16. **Ishchenko E. A.**, Pasternak Y. G., Pendyurin V. A., Fedorov S. M. Applying Virtual Antenna Array Technology to Minimize DOA Errors // Proceedings of 2021 Antenna Design and Measurement International Conference, ADMInC 2021, St. Petersburg, 24–26 November 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 68–70.

17. **Ishchenko E. A.**, Pasternak Y. G., Pendyurin V. A., Fedorov S. M. Tunable Electromagnetic Metallic Wire Crystal for Reconfigurable Antennas and Phase Shifters // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Hangzhou, 21–25 November 2021. – Hangzhou, 2021. – P. 712–720.

18. **Ishchenko E. A.**, Pasternak Y. G., Pendyurin V. A., Rogozin E.A., Fedorov S.M. Waveguide Phase Shifter Based on Controlled Metamaterial // Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 December 2020. – Voronezh, 2021.

19. **Ishchenko E. A.**, Pasternak Y. G., Pendyurin V. A., Fedorov S. M. Integration of Decoupling Capacitors in the Structure of Controlled Metamaterial // Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 December 2020. – Voronezh, 2021. – P. 012067. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012067. – EDN LGUOUK.

20. **Ishchenko E. A.**, Pasternak Y. G., Pendyurin V. A., Rogozin E.A., Fedorov S.M. Horn Antenna with Integrated Metamaterial for Beam Steering // Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 December 2020. – Voronezh, 2021.

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций и другие публикации:

21. **Ищенко Е. А.** Применение материалов аддитивного производства для изготовления обтекателей антенн / **Е. А. Ищенко**, Р. М. Ляпунов, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2025. – С. 47–58.

22. Егорова Е. Д. Антенная система наземного радиолокатора на основе однопроводных линий / Егорова Е. Д., **Ищенко Е. А.**, Пастернак Ю. Г., Проскурин Д. К., Фёдоров С. М. // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2025. – С. 109–113.

23. Баранников И. А. Делитель мощности на основе использования преднамеренных дефектов слоя земли печатной платы / И. А. Баранников, **Е. А. Ищенко**, С. М. Фёдоров // 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ : Сборник научных трудов,

Воронеж, 15 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2025. – С. 33–36.

24. **Ищенко Е. А.** Реализация диаграммообразующего устройства на основе апланатической линзы / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин, Н. Б. Смольянов, С. М. Фёдоров // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2025. – С. 59–66.

25. **Ищенко Е. А.** Многолучевая антенна с полнопространственным сканированием / **Е. А. Ищенко**, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин, С. М. Фёдоров // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2025. – С. 67–71. – EDN BFWUGR

Патенты РФ:

26. Патент на полезную модель № 232787 U1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/38. Компактная широкополосная антенна Bow-Tie : заявл. 10.10.2024 : опубл. 20.03.2025 / **Е. А. Ищенко**, С. М. Федоров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". – EDN KONHTJ.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687015 Российская Федерация. Программа интерактивной визуализации и параметрического анализа контуров диаграммообразующих устройств : № 2024686624 : заявл. 08.11.2024 : опубл. 13.11.2024 / С. М. Фёдоров, И. А. Баранников, **Е. А. Ищенко**, Е. Д. Егорова. – EDN GCZPKZ.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687902 Российская Федерация. Программа расчёта эффективных электромагнитных параметров материалов на основе диэлектрических параметров : № 2024686606 : заявл. 08.11.2024 : опубл. 22.11.2024 / С. М. Фёдоров, Р. Е. Рогозин, **Е. А. Ищенко**, Е. Д. Егорова. – EDN QYAOUG.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687081 Российская Федерация. Программа моделирования и визуализации эффективной площади рассеяния для различных геометрических объектов : № 2024686641 : заявл. 08.11.2024 : опубл. 14.11.2024 / С. М. Фёдоров, **Е. А. Ищенко**, Е. Д. Егорова. – EDN CDBJTA.

Подписано в печать 25.12.2025

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л.: 1,25. Тираж 95 экз. Заказ № 297.

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