

На правах рукописи



СМОЛЯНОВ Никита Борисович

**АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С ОДНОКООРДИНАТНЫМ И
ДВУХКООРДИНАТНЫМ ШИРОКОУГОЛЬНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ
КОМПЛЕКСОВ РАДИОЛОКАЦИИ И СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

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

Научный руководитель **Проскурин Дмитрий Константинович**, доктор 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, профессор, 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 «17» декабря 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 «19» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.286.03,
д.т.н., доцент

 Федоров Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка антенных устройств, обеспечивающих возможность сканирования в широком азимутальном секторе, а также способных осуществлять однокоординатное и двухкоординатное сканирование, является актуальной задачей в современных системах радиолокации и спутниковой связи. Сильное влияние на разработки технологий по данной тематике оказывает стоимость изделий, связанная со сложностью производства фазированных антенных решеток. Особое внимание заслуживают конструкции антенн, обладающих наиболее простой структурой. В связи с постоянно возрастающими требованиями к характеристикам современных антенных систем, становится необходимым новый подход при проектировании устройств, имеющий основу на уже существующих и доступных технологиях.

Одной из наиболее актуальных задач разработки современных антенных систем с широкоугольным однокоординатным и двухкоординатным сканированием является проектирование средств обнаружения летательных аппаратов и реализация комплексов, обеспечивающих спутниковую связь. В целях достижения наилучших характеристик антенных систем, устройства должны обеспечивать формирование узкого главного лепестка диаграммы направленности (ДН) в совокупности с возможностью осуществлять быстрое изменение направления излучения. Помимо этого, отечественные разработчики в данной сфере технологий, проводят работы в направлении импортозамещения с применением доступных компонентов и материалов. Таким образом, улучшение характеристик антенных систем является ключевым направлением исследований, а возможность проектирования отечественными разработчиками конкурентоспособных устройств является актуальной задачей, требующей новых технических решений.

Для проектирования антенных систем, обеспечивающих широкоугольное сканирование, требуется разработка устройств с узким главным лепестком ДН и возможностью быстрого изменения его направления в широком секторе углов. Антенные системы, обеспечивающие двухкоординатное сканирование, основываются на частотно-коммутационном сканировании, базой которым выступают системы диаграммообразования, поддерживающие возможность размещения элементов множественной коммутации.

Для достижения поставленной цели при решении научно-технической задачи по разработке антенных систем с широкоугольным однокоординатным и двухкоординатным сканированием, необходимо найти решения следующих проблемных факторов:

- определение вариантов упрощения конструкции антенн в целях снижения затрат ресурсов и времени на исследование и разработку устройств;
- выбор метода сканирования в целях получения оптимального результата при осуществлении работы в широкоугольном секторе обзора;
- определение оптимальных размеров антенного устройства в зависимости от варианта базирования;

– выбор систем диаграммообразования с целью построения антенной решетки для двухкоординатного сканирования, нейтрализация возникающего эффекта затенения.

Степень разработанности темы. Проектирование антенных решеток обеспечивающих двухкоординатное частотно-коммутационное широкоугольное сканирование рассматривалось во множестве отечественных и зарубежных работ (А.А. Аджибеков, В.В. Ахияров, А. В. Ашихмин, С.Е. Банков, Н.А. Бей, Д.Н. Борисов, Н.А. Бушуев, И.Б. Вендик, А.В. Володько, М. А. Галуза, А.Д. Гладких, М.В. Давидович, А.И. Долбик, А.И. Ерошенко, М.О. Енговатов, М.С. Жук, Г.Ф. Зарганов, С.И. Иванов, В.И. Калинин, В.А. Калашин, И.А. Кирпичева, А. Ю. Киселев, Е.В. Комиссарова, П.Д. Куроптев, Д.В. Кусайкин, Н.П. Кравченко, А.П. Лавров, А. В. Лазарев, К.А. Лайко, В.В. Левяков, А.М. Лерер, О.Ю. Малаховский, М.Б. Мануилов, Г.И. Медведева, Ю.И. Меренкова, С.В. Мухин, И.А. Накрап, К.Т. Нгуен, Е.Ю. Олейник, А.В. Останков, В.В. Паслён, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, М.Г. Петрушанский, С.А. Пресняков, А.С. Разумихин, С.В. Розов, Н.М. Рыскин, А.Н. Савин, Д.М. Сазонов, С. Д. Сапрыкин, Ю.Е. Седельников, Р.А. Силин, А.Л. Соколов, Ю.Л. Соловьев, Г.А. Соломаха, А.А. Сочава, А.Г. Терентюк О.И. Тertyшный, Г.К. Усков, М. А. Утенков, А.В. Фатеев, Ю.О. Филимонова, Е.В. Фролова, N.G. Alexopoulos, M. Asada, C.A. Balanis, G. Bishop, S. Bhattacharjee, J.H. Booske, C.C. Chen, E.D. Cullens, R.E. Diaz, N. Ehsan, E.N. Grossman, R.E. Hodges, S. Hedges, A. Itippibbon, D.R. Jackson, L. Josefsson, A. Kasamatsu, V. Kolinko, L. Ma, M.M. LoRe, J. Lovberg, W.M. Merrill, K. Murano, A.A. Oliner, A. Petosa, Z. Popovic, L. Ranzani, S.R. Rengarajan, T. Rozzi, V. Schwieger, C. Sexton, M. C. Squires, S. Suzuki, S. Thirakoune, K. J. Vanhille, I. Watanabe, L. Zhang), некоторые важные аспекты разработки антенных систем с однокоординатным и двухкоординатным частотным и коммутационным широкоугольным сканированием остаются исследованными в недостаточной степени:

- разработка и исследование волноводов, имеющих замедляющие системы на основе рядов периодических пластин типа «гребенка» или канал в форме меандра, связанные с парами излучающих щелей на стороне узкой стенки, с применением материалов диэлектриков, для осуществления частотного сканирования с высоким уровнем коэффициента направленного действия;
- разработка и исследование антенных устройств для систем спутниковой связи, обеспечивающих независимое многолучевое широкоугольное сканирование на основе плоской линзы Люнеберга и обеспечивающих нейтрализацию эффекта затенения тела линзы облучателями;
- разработка конструкции антенной системы на основе плоской линзы Люнеберга, выступающей в качестве системы диаграммообразования, и антенной решетки, состоящей из щелевых волноводов с внутренними замедляющими системами;
- разработка и исследование линейных антенных решеток на основе периодических структур для осуществления однокоординатного и двухкоординатного частотно-коммутационного сканирования, обеспечивающих нейтрализацию эффекта ослепления;
- разработка и исследование планарной антенны на основе плоского волновода и дифракционной решетки для осуществления широкоугольного частотного сканирования.

Объектом исследования являются антенные системы, обеспечивающие широкоугольное однокоординатное и двухкоординатное частотное, коммутационное или комбинированное сканирование для комплексов радиолокации и систем спутниковой связи.

Предметом исследования являются методы и способы широкоугольного однокоординатного и двухкоординатного сканирования, в которых используются антенные решетки с применением диэлектрических материалов, а также способы и методы снижения влияния эффекта «ослепления».

Целью работы является проектирование и исследование антенных решеток, обеспечивающих однокоординатное и двухкоординатное широкоугольное сканирование, применение которых позволяет обеспечить высокую эффективность работы сканирующих систем с возможностью управления направлением главного лепестка ДН. Практическая реализация антенных систем, отвечающих подобным требованиям, ограничивается доступными ресурсами и технологическими возможностями производства, поэтому для решения сложившегося противоречия были произведены исследования малораспространенных вариантов построения антенных устройств. С целью проектирования рассматриваются конструкции диэлектрических волноводов и системы диаграммообразования на основе плоских линз, обеспечивающих возможность формирования антенных систем с коммутационным методом сканирования.

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

- исследование и разработка конструкции антенной решетки, обеспечивающей независимое многолучевое частотно-коммутационное широкоугольное сканирование на основе двухслойной цилиндрической линзы Люнеберга;
- исследование и разработка конструкции волноводно-щелевых антенн на основе прямоугольного волновода с внутренними замедляющими системами и применением диэлектрических материалов для заполнения волноводного канала;
- исследование и разработка антенного устройства, конструкция которого основана на технологии плоской линзы Люнеберга и антенной решетке, представляющей собой массив из щелевых прямоугольных волноводов, обладающих внутренними замедляющими системами для реализации частотно-коммутационного сканирования без эффекта затенения;
- исследование и разработка конструкции антенных решеток для осуществления однокоординатного угломестного сканирования;
- исследование и разработка планарной антенны вытекающей волны на основе диэлектрического волновода и дифракционной решетки, состоящей из металлических лент с заданным периодом, обеспечивающей частотное сканирование;
- проведение экспериментальных исследований планарной антенны с частотным сканированием для проверки расчетных характеристик согласования, диаграммы направленности и углов частотного сканирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана методика построения антенной системы с применением технологии плоской двухслойной линзы Люнеберга, структура которой основана на синтезе метаматериальной поверхности, служащей для разделения тела линзы на две части, что отличает ее от аналогов и позволяет реализовать систему без возникновения

эффекта затенения; перфорация организована на основе гексагональной сетки, в следствии чего достигается изотропность структуры, при которой электромагнитная волна будет распространяться с одинаковой скоростью во всех направлениях, что обеспечивает формирование одинаковых лучей ДН, существующие разработки предлагают иную форму перфорации обеспечивающую анизотропное распространение, что влечет за собой изменение формы ДН, в зависимости от направления излучения; антенная система имеет активный характер, и обладает большой полосой рабочих частот за счет возможности размещения широкополосных трансформаторов на поверхности линзы в разных местах, что отличает антенну от существующих конструкций устройств имеющих пассивный характер и применяющих монополи в качестве элементов возбуждения;

- разработана методика создания антенных устройств на основе прямоугольных волноводов, отличающихся структурой внутренней замедляющей системы, имеющей связь с парами периодических щелей на стороне узкой стенки; определено влияние параметров диэлектрических материалов и формы замедляющей системы на характеристики волновода; снижение фазовой скорости излучения в совокупности со щелями, расположенными с определенным периодом, обеспечивают высокий уровень характеристик излучения при низком уровне боковых лепестков, что позволяет осуществить частотное сканирование в широком азимутальном секторе;

- разработана методика построения планарной антенны, основанной на эффекте преобразования поверхностных волн в объемные и объемных волн в поверхностные, внутри структуры волновода и связанной с ним дифракционной решетки; устройство сочетает частотный и механический способ управления ДН; синтез конструкции антенной решетки произведен из расчета обеспечения емкостного импеданса, в целях нейтрализации эффекта ослепления, возникающего при широкоугольном сканировании; конструкция антенной системы отличается от известных устройств оптимизацией параметров для осуществления механического сканирования за счет изменения периода дифракционной решетки, что позволяет улучшить возможности сканирования, другим отличием является упрощение конструкции за счет отсутствия необходимости включения в состав устройства фазовращателей и других сложных компонентов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методик проектирования антенных систем с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием, частотным способом в угломестной плоскости, и по азимуту, на основе коммутации, либо, электромеханическим способом. Показана возможность применения волноводно-щелевых антенн с внутренними замедляющими структурами типа «гребенка» в качестве элементов антенной решетки, обеспечивающих частотное управление ДН. Показана возможность формирования полноазимутальных антенных систем без эффекта затенения тела линзы облучателями.

Практическая значимость работы заключается в разработке антенных решеток, обеспечивающих широкоугольное однокоординатное и двухкоординатное сканирование исключая возникновение эффекта затенения диаграммообразующей системы линзового типа облучателями, без применения в составе конструкции слож-

ных технических устройств; испытание макета антенной системы мобильного размещения с возможностью механического сканирования и упрощенной технологией изготовления.

Методы исследования. В работе использовались методы синтеза и анализа антенных устройств, вычислительные методы технической электродинамики и стандартные методики натурных экспериментальных исследований антенных устройств СВЧ-диапазона волн.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

– установлено, что использование двухслойной плоской цилиндрической линзы Люнеберга в качестве диаграммообразующей системы антенного устройства позволяет обеспечить частотное сканирование с минимизацией эффекта затенения на основе практического применения теории связанных волн. Показано взаимное влияние элементов возбуждения электромагнитной волны на входных портах антенной решетки. Выяснено, что двухслойная линза Люнеберга с разделяющим перфорированным экраном в составе конструкции антенной решетки позволяет обеспечить сканирование в широком угловом секторе до 180° в диапазоне частот от 5.8 ГГц до 6.2 ГГц. Разработана методика построения антенных систем для обеспечения многолучевого частотно-коммутационного сканирования;

– установлено, что на основе прямоугольных волноводов, имеющих в составе собственной конструкции замедляющие структуры, возможно построить антенную систему, обеспечивающую частотное сканирование. Показано, что сочетание структур, обеспечивающих снижение фазовой скорости, и пар периодических излучающих щелей, позволяет обеспечить частотное сканирование в широком угловом секторе вплоть до 360° в диапазоне частот от 9 ГГц до 10 ГГц, при низком уровне боковых лепестков. Показано, что диаграммообразующая система для такого антенного устройства может быть реализована на основе линзы Люнеберга, либо линзы Ротмана, в целях осуществления частотно-коммутационного двухкоординатного сканирования в азимутальной и угломестной плоскости;

– установлено, что при формировании антенной решетки на основе Н-плоскостных рупоров и Н-плоскостных желобковых волноводов, возможно сформировать антенные решетки, обеспечивающие формирование главных лепестков ДН игловидной формы, с возможностью осуществлять сканирование в угловом секторе, составляющем 90° в диапазоне частот от 10 ГГц до 10.5 ГГц. Высокий уровень согласования элементов решетки в совокупности с диаграммообразующей системой, позволяет реализовать частотно-коммутационное сканирование;

– показано, что планарная антенна, сформированная на основе дифракционной решетки, обладающей возможностью изменения периода механическим способом, позволяет реализовать частотное сканирование в азимутальной плоскости в секторе до 90° в диапазоне частот от 10.9 ГГц до 12.5 ГГц. Полученная антенна обеспечивает формирование управляемого узконаправленного луча ДН, что позволяет осуществлять сканирование без необходимости включения в состав системы фазовращателей.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена использованием в работе известных методов анализа и синтеза антенных устройств, методов ма-

тематического моделирования, а также корректным применением известных вычислительных методов технической электродинамики и натурных экспериментальных исследований для верификации полученных результатов. Для осуществления расчетов и моделирования применялись системы автоматизированного проектирования PTC MathCAD, MATLAB R2024b, DS CST Studio Suite 2025. Результаты работы не противоречат фундаментальным законам физики, электродинамики, а также соответствуют полученным ранее результатам опубликованных работ других авторов. Натурные испытания проводились с помощью поверенных измерительных устройств Rohde&Schwarz.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях: XXIX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2023); XXX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж 2024); XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», посвященная 130-летию изобретения радио (Воронеж 2025), XXXII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», (Воронеж 2026).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены в АО НПП «Автоматизированные системы связи», АО «ИРКОС». 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-2024-0006 «Разработка и исследование принципов создания системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов с использованием аэромобильных антенных систем».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах: 7 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 7 – работ представлено в сборниках трудов международных научно-технических конференций и других научных публикаций, получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора Основные результаты диссертации, имеющие научную новизну и выносимые на защиту, были получены автором самостоятельно. В работах [90], [91], [92], [94] автором исследованы антенные устройства, имеющие в своем составе структуры простой конструкционной формы, исследована возможность применения данных антенн в системах спутниковой связи и работы в системах GPS и ГЛОНАСС. В работах [100], [101], [103] автором исследованы прямоугольные волноводы, имеющие в составе конструкции внутренние замедляющие системы в форме периодических структур и вставки из диэлектрических материалов, исследована возможность их применения в составе антенных решеток для осуществления частотного

сканирования. В работе [84] автором исследуются методы электродинамического моделирования антенных устройств в САПР, рассматривается точность и время расчетов. В работах [26] и [83], автором исследованы антенные устройства, в составе которых, диаграммообразующим элементом выступает плоская цилиндрическая линза Люнеберга, исследована возможность применения устройств для осуществления многолучевого сканирования. В работах [106], [109], [122] автором исследованы варианты антенных устройств, обеспечивающих сканирование в широком секторе обзора. В работах [128] и [129] автором рассматривается конструкция планарной антенны, на основе плоского диэлектрического волновода, предназначенной для работы в полосе частот от 10.9 ГГц до 12.5 ГГц, исследована возможность механической подстройки дифракционной решетки.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует 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 высоко-эффективную 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».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 168 страницах, содержит 77 рисунков и 2 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 будущего направления развития антенных систем с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием. Выполнен анализ перспективных направлений развития фазированных антенных решеток. Рассмотрены структурные особенности, способы применения и варианты построения антенных устройств на основе технологии линзы Люнеберга для осуществления многолучевого широкоугольного сканирования. Рассмотрены волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР), имеющие внутренние замедляющие системы – «петляющий волновод», периодическая гребенка, ряды диафрагм и добавление в полость волновода вставок из диэлектрических материалов. Рассмотрены варианты конструкций планарных антенн и применение дифракционных решеток. Были сформулированы основные задачи, выполнение которых позволит устранить ряд существующих технических недостатков антенных устройств с широкоугольным однокоординатным и двухкоординатным сканированием.

Во второй главе представлен варианты реализации конструкции антенной решетки на основе плоской двухслойной линзы Лüneберга, для систем спутниковой связи, обеспечивающей двухкоординатное широкоугольное сканирование.

Разработана методика построения антенной системы с применением технологии плоской двухслойной линзы Лüneберга, структура которой основана на синтезе метаматериальной поверхности, служащей для разделения тела линзы на две части, что отличает ее от аналогов и позволяет реализовать систему без возникновения эффекта затенения. В методике проектирования антенного устройства можно выделить несколько основных этапов. Начальным этапом является определение ключевых параметров и требуемых характеристик антенны. При разработке устройства для системы ЭРА-ГЛОНАСС, ключевыми параметрами является диапазон частот, соответствующий С-диапазону. Его особенностью является высокая стабильность работы в условиях неблагоприятных метеословий. Помимо этого, антенное устройство должно обладать широким угловым сектором сканирования. Для достижения указанных параметров, целесообразно использовать, в качестве центрального элемента антенного устройства, двухслойную линзу Лüneберга, применение которой позволит обеспечить широкоугольное сканирование в диапазоне частот от 5.8 ГГц до 6.2 ГГц в секторе составляющем 180° . Следующим этапом проектирования является разработка модели антенного устройства с помощью специализированного ПО в целях дальнейшего моделирования. На Рисунке 1 приводится модель МАР для ЭРА-ГЛОНАСС.

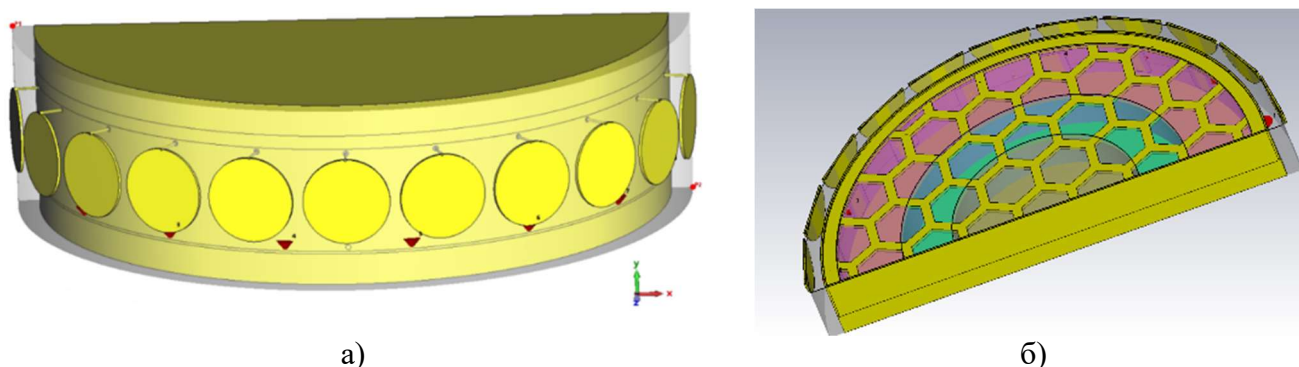


Рисунок 1 – Модель МАР для систем ЭРА-ГЛОНАСС: а) общий вид модели антенного устройства; б) вид устройства в разрезе, включающий в себя перфорированный экран

При разработке модели устройства необходимо учитывать параметры сетки, такие как число разбиения модели на число ячеек, и влияние их количества на точность расчетов для проведения анализа характеристик. При этом необходимо рационально использовать доступные ресурсы и время, что возможно обеспечить при использовании программы CST Studio Suite 2025. Проведения анализа характеристик в программе возможно осуществить на основе метода конечного интегрирования Вейланда в пространственно-временной области.

Конструкция МАР имеет вид половины цилиндра. Такая форма обеспечивает работу устройства в широком азимутальном секторе без возникновения эффекта затенения. Линза Лüneберга установлена в металлическом корпусе, за счет чего формируется двухслойный планарный диэлектрический волновод, короткозамкнутый на месте среза. Плоскость линзы состоит из нескольких полуколец, состоящих из неод-

народных диэлектрических материалов: полистирола, полиэтилена и тефлона с коэффициентом диэлектрической проницаемости 2.5, 2.3 и 2.1 соответственно. Полукольца располагаются в порядке уменьшения диэлектрической проницаемости от центра к внешней границе линзы. Полукольца формируют два слоя линзы Лüneберга, разделенные металлическим экраном, имеющим периодические отверстия шестиугольной формы с длинной стороны равной 6.95 мм.

Модель антенного устройства и оптимальные конфигурации плоской линзы Лüneберга определены с помощью метода параметрического синтеза, в целях получения наилучших характеристик устройства.

Для оценки эффективности работы антенного устройства, рассматривается значение коэффициента отражения на входе облучателя (S_{11} -параметр). Результаты моделирования устройства, для четырех вариантов коммутации на точках входных портов устройства, представлены на Рисунке 2. Результаты моделирования для четырех портов, расположенных с противоположной стороны, будут схожими в связи с симметричной формой устройства.

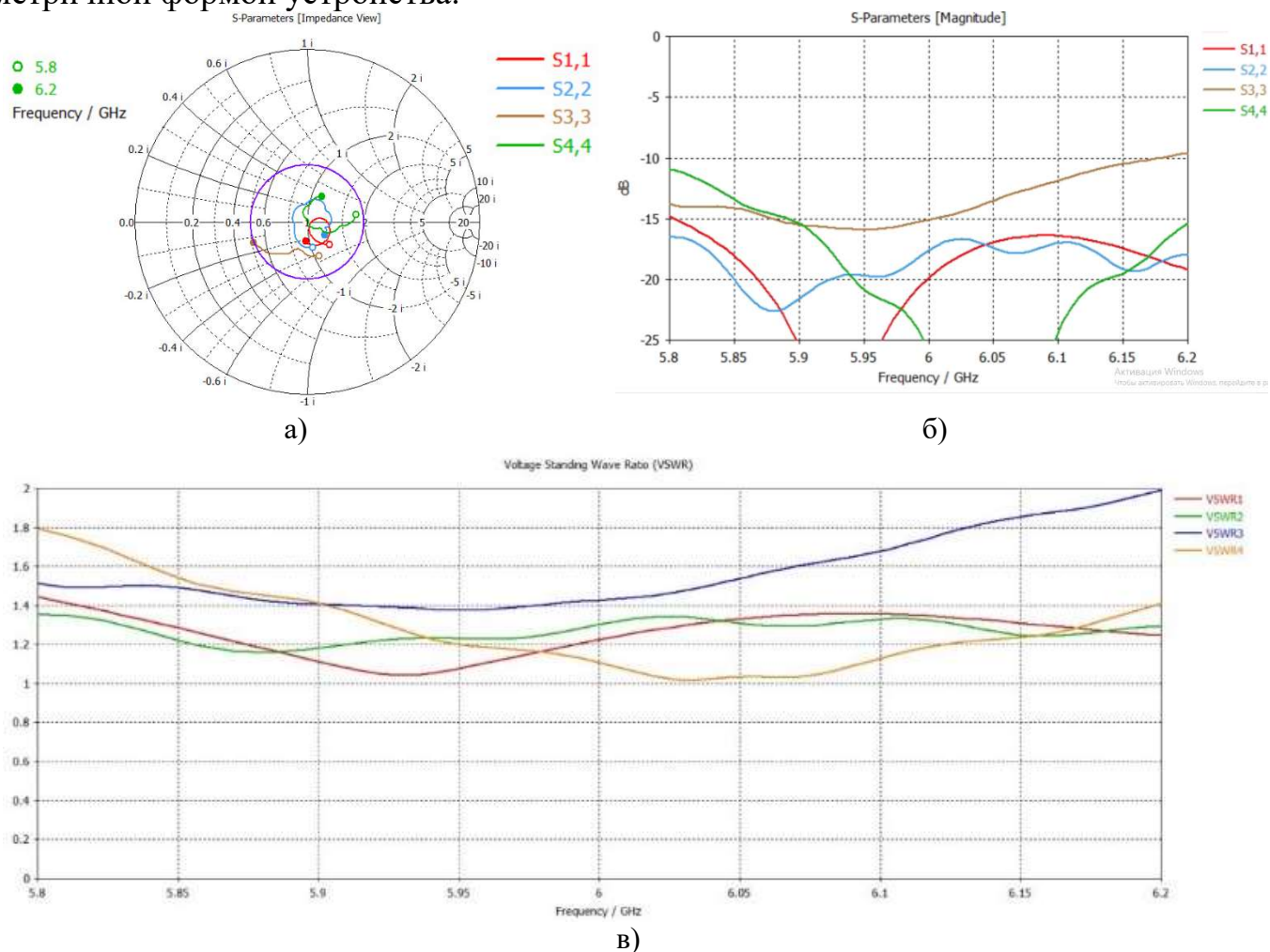


Рисунок 2 – Результаты расчета МАР: а) номограмма Вольперта-Смита в активном режиме работы; б) графики S_{11} -параметра для 1 – 4 варианта коммутации МАР для ЭРА-ГЛОНАСС; в) значение коэффициента стоячей волны на входах четырех полосковых линий

Особенностью разработанной антенной системы, в сравнении с аналогичными устройствами, является перфорация металлического экрана, соединяющая две половины линзы Лüneберга. Она выполнена на основе гексагональной сетки, в следствии

чего достигается изотропность структуры, при которой электромагнитная волна будет распространяться с одинаковой скоростью во всех направлениях, что обеспечивает формирование одинаковых лучей ДН. Существующие разработки предлагают иную форму перфорации, обеспечивающую анизотропное распространение, что влечет за собой изменение формы ДН, в зависимости от направления излучения. Антенная система имеет активный характер, и обладает большой полосой рабочих частот за счет возможности размещения широкополосных трансформаторов на поверхности линзы в разных местах, что отличает антенну от существующих конструкций устройств, имеющих пассивный характер и применяющих монополи в качестве элементов возбуждения. На Рисунке 3 представлены результаты моделирования ДН.

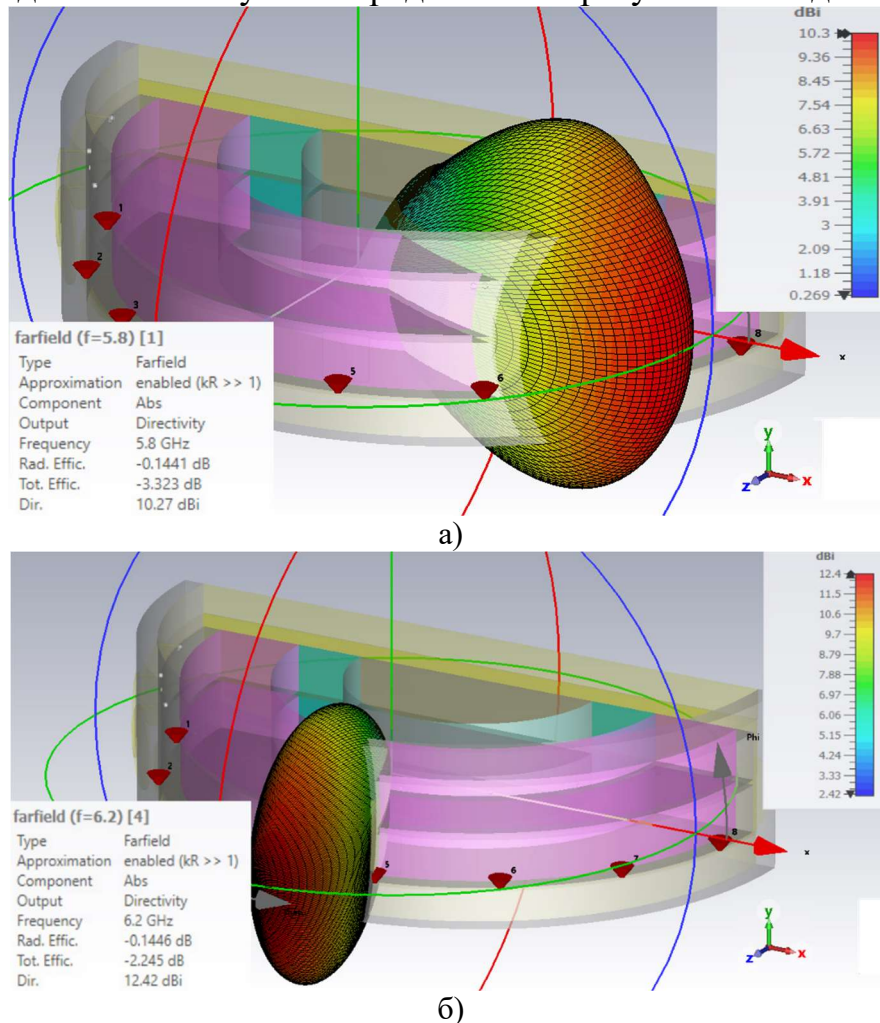


Рисунок 3 – Результаты моделирования ДН при работе различных излучающих элементов МАР: а) на частоте 5.8 ГГц, ДН при работе первого излучающего элемента; б) на частоте 6.2 ГГц, ДН при работе четвертого излучающего элемента

Результаты моделирования многолучевого антенного устройства демонстрируют высокие характеристики ДН и минимальные изменения формы во всей полосе рабочих частот от 5.8 ГГц до 6.2 ГГц. Особенности конструкции антенного устройства позволяют формировать несколько независимых лучей ДН, разнонаправленных в секторе сканирования до 180° и обладающих схожей формой вне зависимости от задействованного в работе в данный момент излучающего элемента. Таким образом,

была получена конструкция антенного устройства, обладающего возможностью реализации многолучевого сканирования в широком секторе пространства, на основе плоской цилиндрической линзы Люнеберга.

Полученные результаты моделирования обеспечивают данными, требуемыми для разработки и построения макета антенного устройства, что является финальным этапом методики проектирования антенной системы.

Третья глава посвящена исследованию и разработке линейных антенных решеток на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования.

Разработана методика создания антенных устройств на основе прямоугольных волноводов, отличающихся структурой внутренней замедляющей системы, имеющей связь с парами периодических щелей на стороне узкой стенки. Рассматриваемая структура антенной системы позволяет обеспечить широкоугольное частотно-коммутационное сканирование. При проведении начального этапа проектирования, определялся вид диаграммообразующей системы, и элементов волноводно-щелевой антенной решетки, которые позволят обеспечить нейтрализацию эффекта ослепления.

Одним из основных параметров для волноводов в составе фазированных антенных решеток является углочастотная чувствительность. На ее уровень оказывают влияние замедляющие системы внутри волноводных каналов, а также введение в их конструкцию диэлектрических компонентов. Альтернативным вариантом увеличения углочастотной чувствительности является увеличение длины волноводного канала без увеличения расстояния между излучающими щелями.

В целях достижения наилучших параметров антенного устройства, был проведен параметрический синтез прямоугольного волновода с парами периодических излучающих щелей и замедляющей системой на основе канала в форме меандра с применением диэлектрических материалов. На Рисунке 4 представлена трехмерная модель волновода в разрезе.

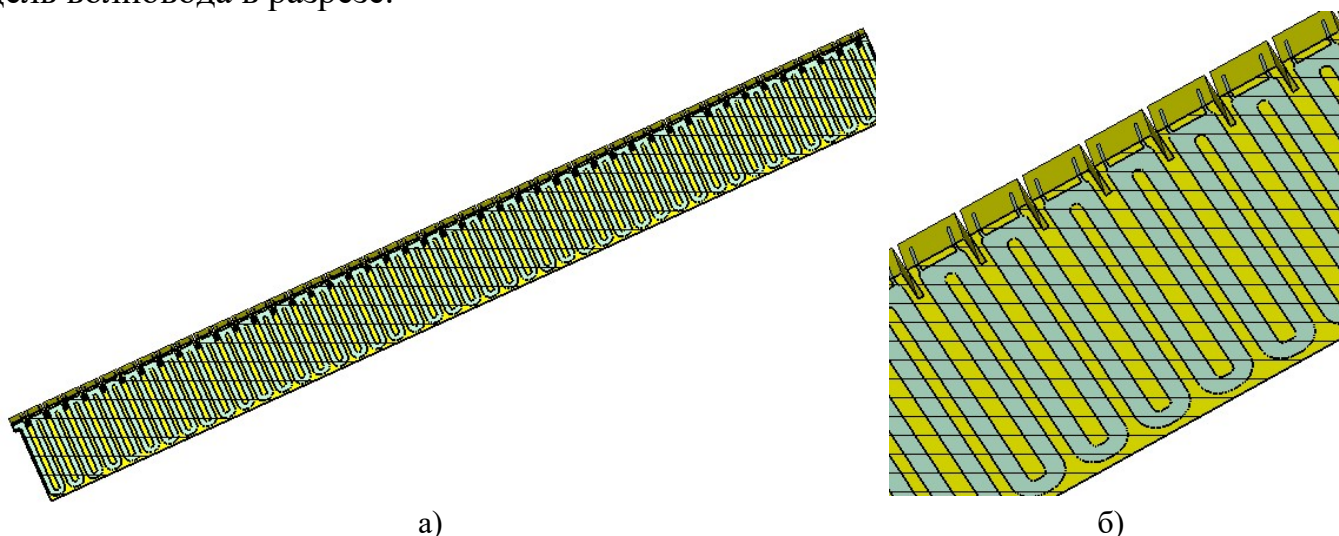


Рисунок 4 – Трехмерная модель волновода с каналом в форме меандра и парами периодических излучающих щелей: а) вид в разрезе; б) участок волновода с излучающими щелями в приближении

Конструкция волновода обеспечивает возможность частотного сканирования. На Рисунке 5 приводятся основные характеристик волновода и результат расчета ДН.

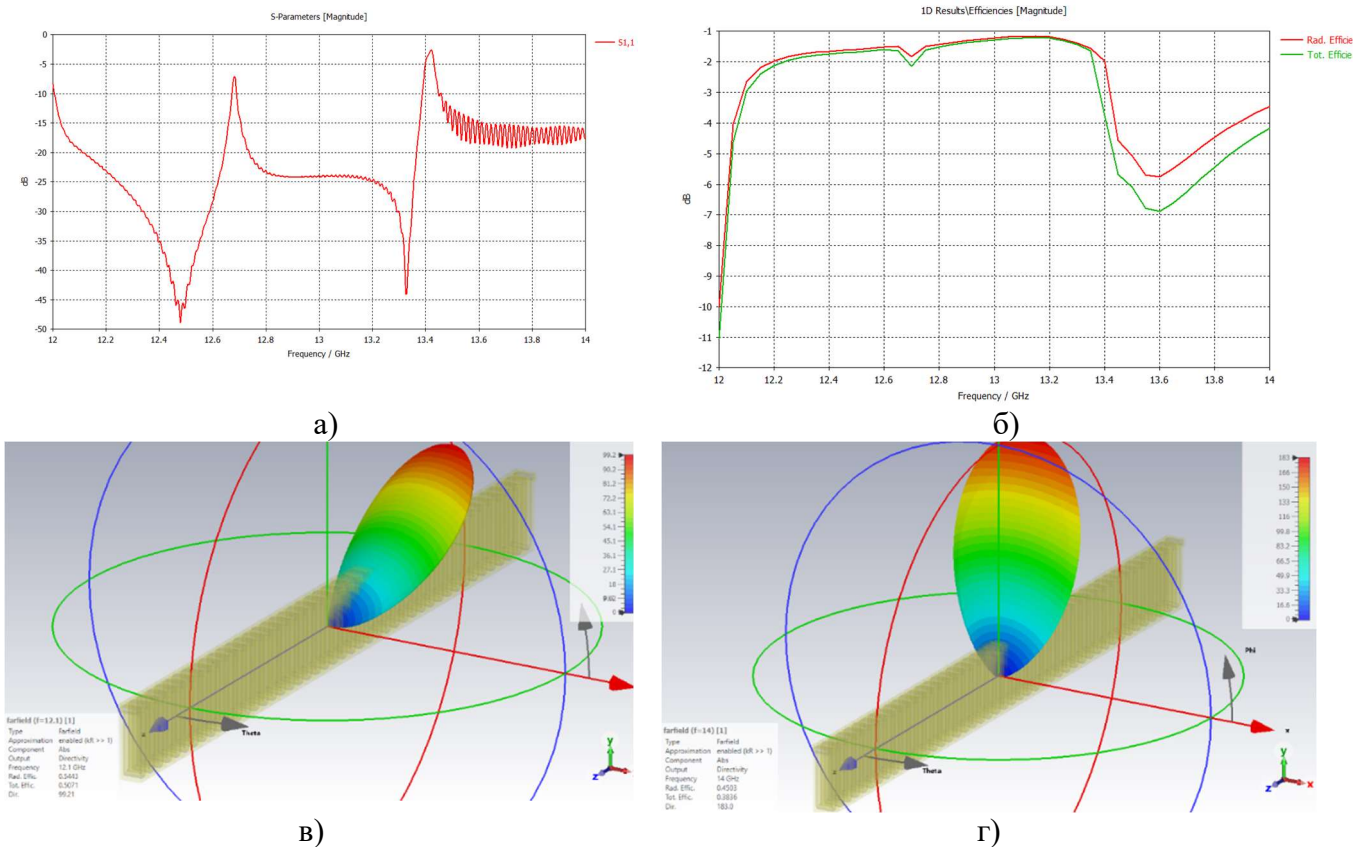


Рисунок 5 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик волновода: а) коэффициент отражения на входе волновода; б) потери в металле и диэлектрике (красная), и суммарные потери, с учетом рассогласования с питающей его полосковой линией (зеленая); в) ДН на частоте 12.1 ГГц; г) ДН на частоте 14 ГГц

На основе анализа характеристик моделированного волновода, продемонстрировано, что в пределах диапазона от 12 ГГц до 14 ГГц, направление главного лепестка ДН регулируется в пределах азимутального сектора 54° в зависимости от частоты. Во всей полосе рабочих частот основные характеристики сохраняются на одном уровне.

Разработка и моделирование антенного устройства на основе ВЦАР в совокупности с диаграммообразующей системой, представляющей собой плоскую линзу Люнеберга, потребует больших затрат времени и вычислительных мощностей. Поэтому, в целях сокращения требуемых ресурсов, необходимо определение возможностей упрощения модели, например, выбор более простого метода стратификации линзы Люнеберга или минимизация числа ячеек сетки формирующих элементы модели. Разработанная модель устройства представлена на Рисунке 6.

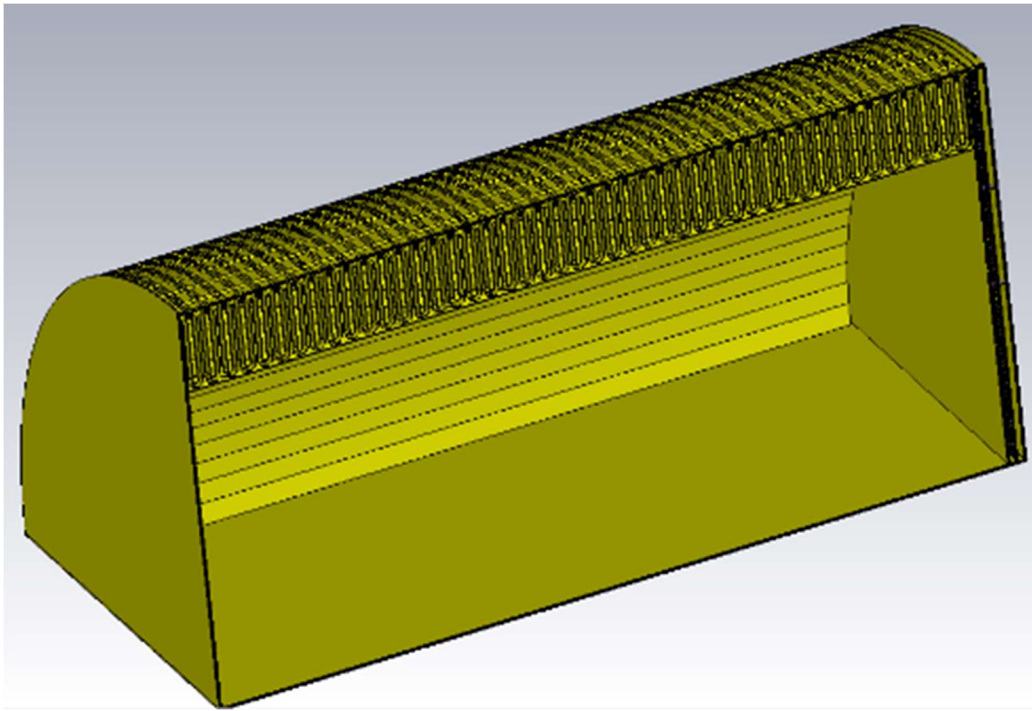


Рисунок 6 – Модель ФАР в форме половины цилиндра на основе плоской линзы Лüneберга в разрезе

Плоская линза Лüneберга в форме половины цилиндра служит основой антенной решетки, ее радиус составляет – 338 мм, а толщина тела линзы – 12.1 мм. Стратификация линзы, произведена методом программной оптимизации параметров слоев, по результатам которой были рассчитаны три диэлектрических полукольца. Элемент, расположенный в центре линзы, имеет радиус 152 мм, коэффициент диэлектрической проницаемости составляет 2.5. Наиболее оптимальным материалом для формирования центральной части линзы является полистирол. Помимо его соответствия требуемым характеристикам, он является относительно дешевым и доступным материалом. Центральное полукольцо линзы имеет ширину 82 мм и коэффициент диэлектрической проницаемости 2.3, данному требованию соответствует материал полиэтилен. Внешний диэлектрический элемент линзы, в соответствии с расчетами, обладает диэлектрической проницаемостью равной 2.1 и имеет ширину 104 мм. Материалом соответствующим указанным требованиям является тефлон.

С линзой Лüneберга соединен массив элементов, состоящий из 45 прямоугольных волноводов, длина каждого из которых составляет 661.32 мм, а внутреннее сечение 68x19 мм. Волноводы имеют заполнение диэлектрическим материалом – полистиролом. К линзе Лüneберга примыкают патч-элементы, питание которых осуществляется через 79 коаксиальных входа антенной системы. Угловой сектор диаграммообразования антенного устройства составляет 180°. На Рисунке 7 представлены ДН в зависимости от частоты.

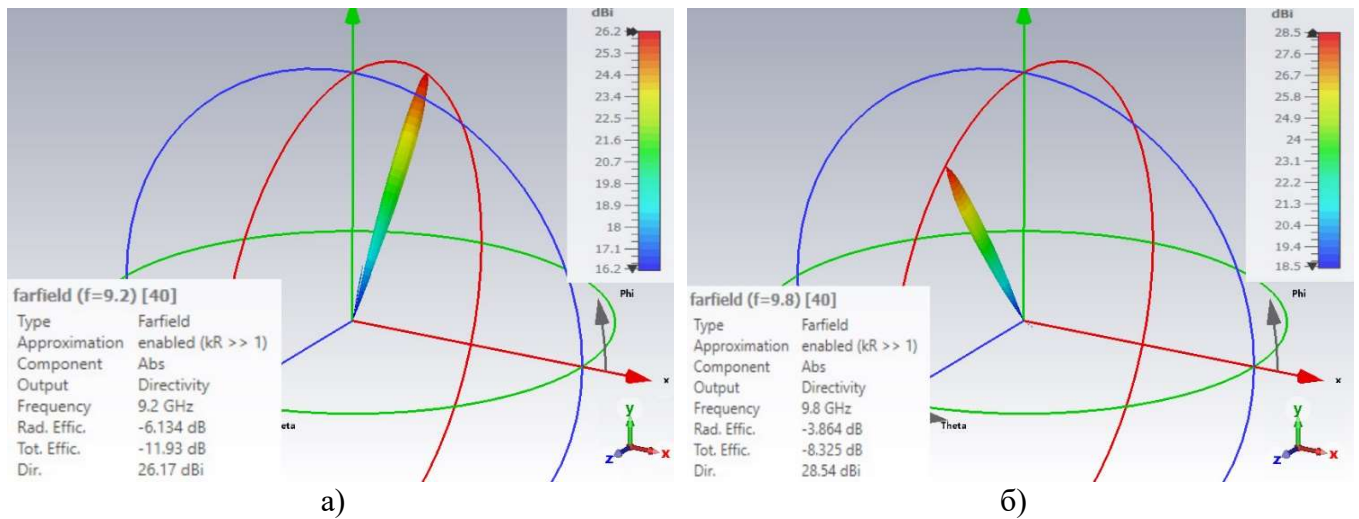


Рисунок 7 – Основные характеристики ФАР в рабочем частотном диапазоне: а) ДН на частоте 9.2 ГГц; б) ДН на частоте 9.8 ГГц

Полученная ДН демонстрирует высокие значения КНД, узкий главный лепесток ДН и низкий уровень боковых лепестков. Таким образом, путем программной оптимизации параметров антенного устройства, были получены оптимальные параметры модели, позволяющие достичь высокий уровень характеристик устройства.

Разработанная трехмерная модель позволяет оценить работоспособность антенного устройства, а также обеспечивает информацией о параметрах, требуемых для изготовления макета устройства.

Четвертая глава посвящена исследованию планарных антенн и экспериментальным измерениям макета антенны на основе плоского волновода, соединенного с дифракционной решеткой.

Разработана методика построения планарной антенны, основанной на эффекте преобразования поверхностных волн в объемные, и объемных волн в поверхностные, внутри структуры волновода и связанной с ним дифракционной решетки. В процессе выполнения начального этапа методики реализации антенного устройства, были определены основные элементы конструкции. Основой разработанной планарной антенны является плоский диэлектрический волновод, на поверхности которого расположен ряд периодических металлических пластин, формирующих дифракционную решетку. В целях уменьшения габаритных размеров и получения более обтекаемой формы устройства, был выбран вариант торцевого возбуждения, с помощью рупорного элемента, примыкающего к меньшей стороне волновода. Такая конструкция является наиболее простой и доступной для изготовления.

Антенное устройство сочетает частотный и механический способ управления ДН. Конструкция антенной системы отличается от известных устройств оптимизацией параметров, требуемых для осуществления механического сканирования за счет изменения периода дифракционной решетки, что позволяет улучшить возможности сканирования. Другим отличием является упрощение конструкции за счет отсутствия необходимости включения в состав устройства фазовращателей и других сложных компонентов. На Рисунке 8 представлена модель планарной антенны с установленным рядом периодических пластин и вариант механизма, соединяющего металлические ленты друг с другом.

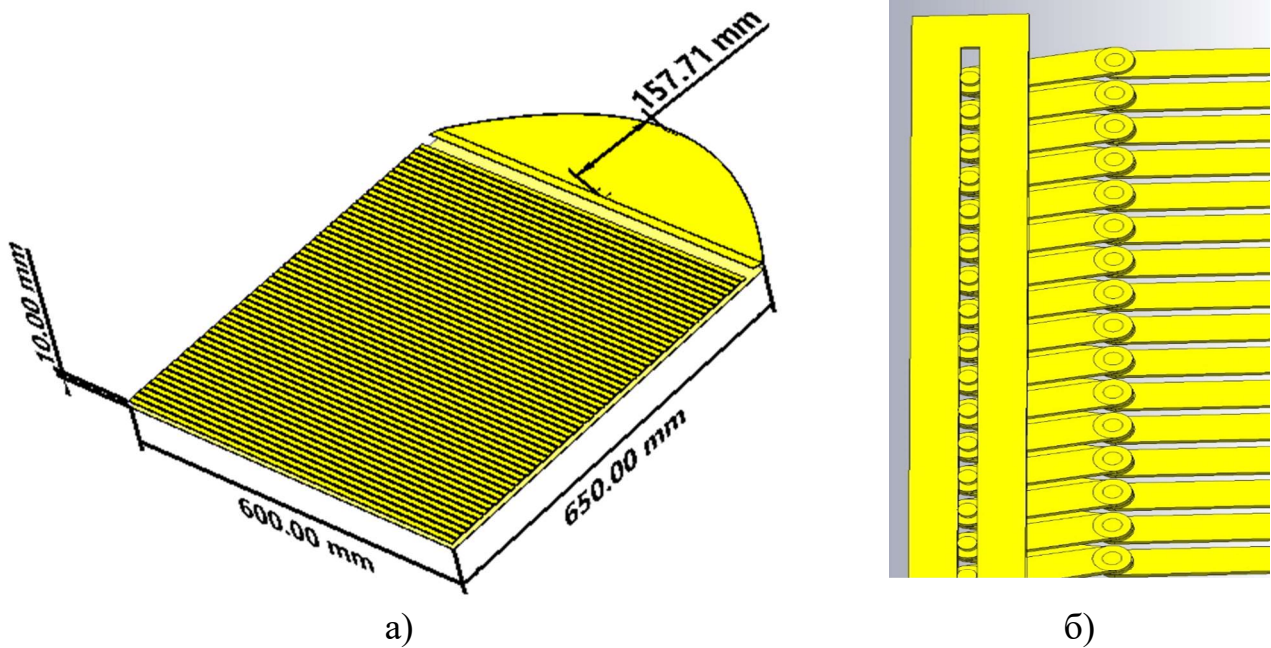


Рисунок 8 – Модель планарной антенны с регулируемой периодической решеткой:
а) внешний вид с габаритными размерами; б) вариант механизма, соединяющего металлические ленты друг с другом

Плоская форма конструкции обеспечивает низкое аэродинамическое сопротивление устройства, что, вместе с небольшой массой и габаритами, позволяет использовать антенну, как часть стационарных систем, так и комплексов мобильного размещения.

Спутниковые системы связи, устанавливаемые на мобильных объектах, действуют в Ku- диапазоне волн 10.7 – 12.75 ГГц. Помимо этого, данный диапазон применяется для спутникового телевидения. Рабочий диапазон планарной антенны с механическим сканированием выбран от 10.9 ГГц до 12.5 ГГц.

Изменение периода дифракционной решетки позволяет управлять главным лепестком ДН в азимутальной плоскости, при этом характеристики сохраняются на приемлемом уровне для рабочего режима излучения. В процессе электродинамического моделирования получены графики значения коэффициента отражения на входе антенной системы и ДН, они представлены на Рисунках 9 – 11.

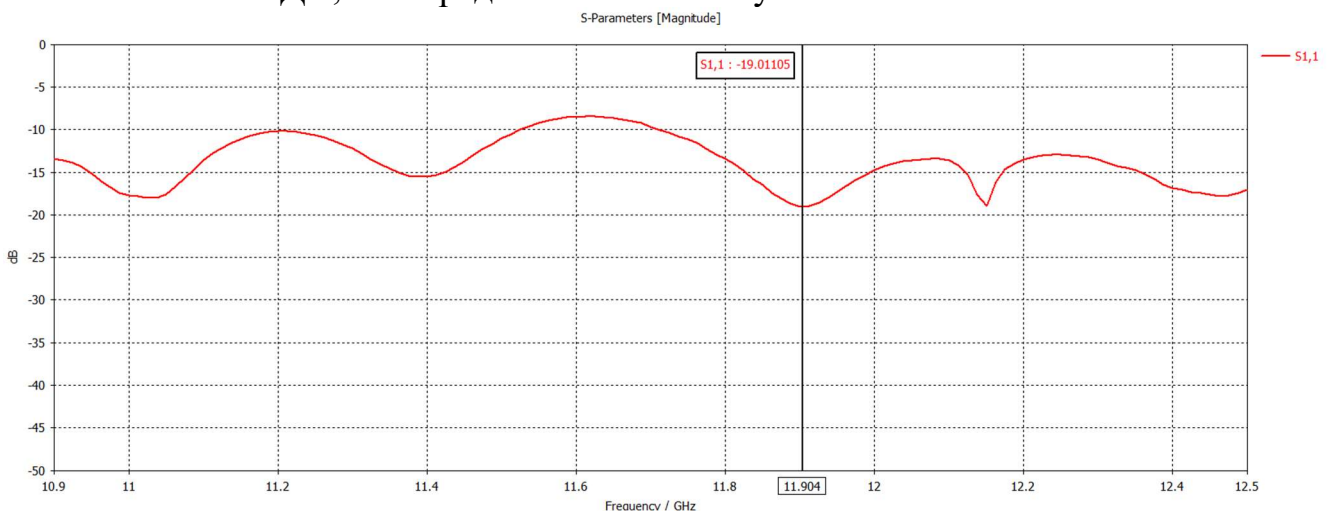
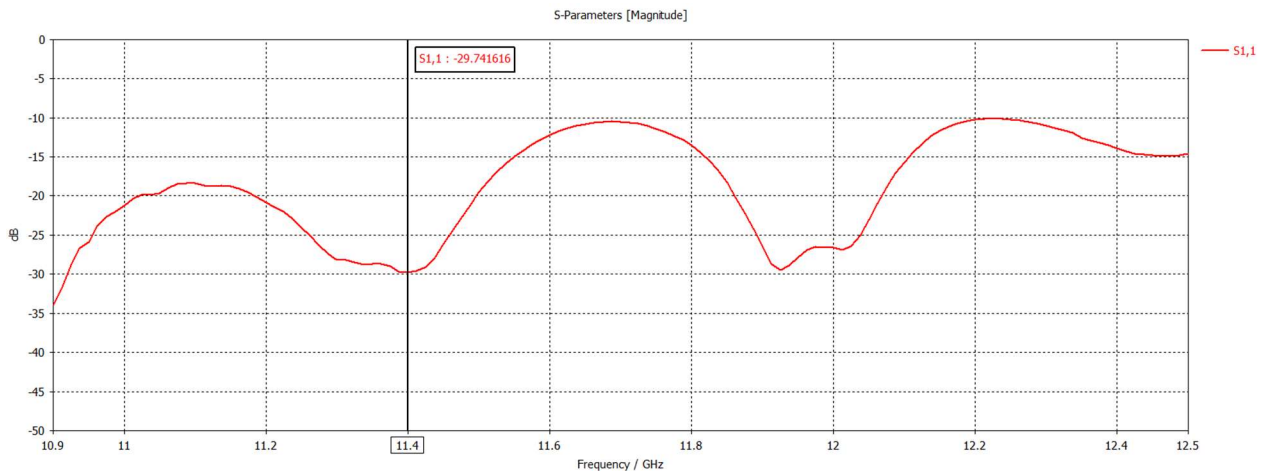
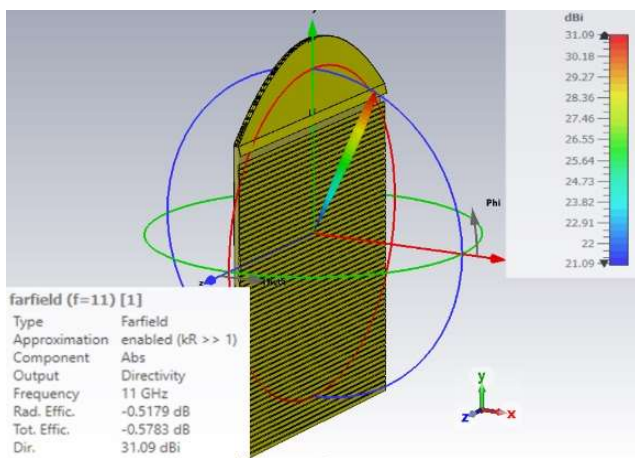


Рисунок 9 – Результаты расчета S_{11} -параметра при периоде дифракционной решетки 14 мм

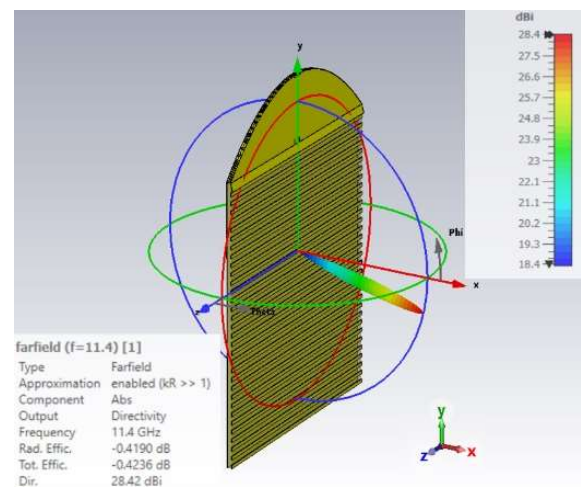


б)

Рисунок 10 – Результаты расчета S_{11} -параметра при периоде дифракционной решетки 20 мм



а)



б)

Рисунок 11 – Результаты моделирования ДН планарной антенны в зависимости от периода дифракционной решетки и частоты: а) 11 мм, 11 ГГц; б) 20 мм, 11.4 ГГц

Полученные в результате моделирования ДН демонстрируют игловидную форму главного лепестка, неизменную во всей полосе рабочих частот. Модель антенного устройства демонстрирует высокий уровень характеристик ДН, при минимальном изменении ширины главного лепестка, а также низком УБЛ. Азимутальный сектор сканирования по оси соответствующей $\varphi = 0^\circ$ не изменяется, и осуществляется в направлении перпендикулярном плоскости волновода. Для изменения сектора сканирования по данной оси необходимо задействовать поворотный механизм антенной системы. По оси соответствующей $\Theta = 90^\circ$ направление главного лепестка ДН изменяется в азимутальном секторе, имеющем ширину минимум 50° .

Следующим этапом методики реализации антенного устройства является разработка макета на основе имеющихся параметров электродинамической модели.

В процессе изготовления макета применялись аддитивные технологии. Для оценки работоспособности разработанного и собранного макета антенного устройства проводились измерения основных характеристик – возвратные потери (S_{11} -параметр) и ДН. На Рисунке 12 показан макет антенны, в процессе подготовки к измерениям в безэховой камере.



а)



б)

Рисунок 12 – Макет планарной антенны во время подготовки к натурным измерениям в безэховой камере

В процессе исследований, измерения S_{11} -параметра проводились с периодом дифракционной решетки равным 20 мм, результат измерений приводится на Рисунке 13.

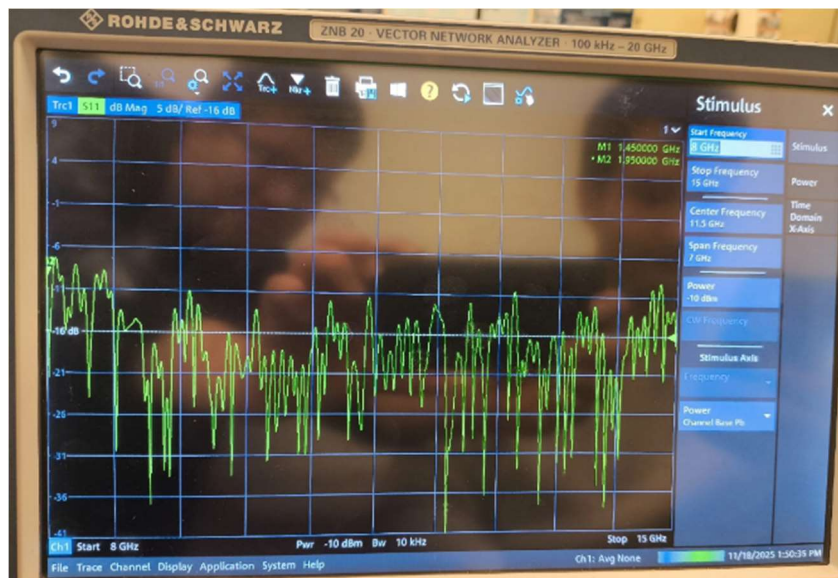


Рисунок 13 – Результаты измерений возвратных потерь планарной антенны

Полученные результаты демонстрируют, что разработанная антенна обладает высоким уровнем согласования в полосе частот от 8 ГГц до 15 ГГц. Уровень согласования в диапазоне от 10.8 ГГц до 12.5 ГГц позволяет эффективно проводить частотное сканирование.

Измерение ДН антенны проводилось в двух плоскостях для оценки возможности азимутального и угломестного сканирования. Для этого антенна устанавливалась на вращающуюся платформу и располагалась в вертикальном и горизонтальном по-

ложении соответственно. Измерения проводились в передней полусфере составляющей 180° . Результаты измерений ДН в зависимости от рабочей частоты и периода дифракционной решетки приводятся на Рисунке 14.

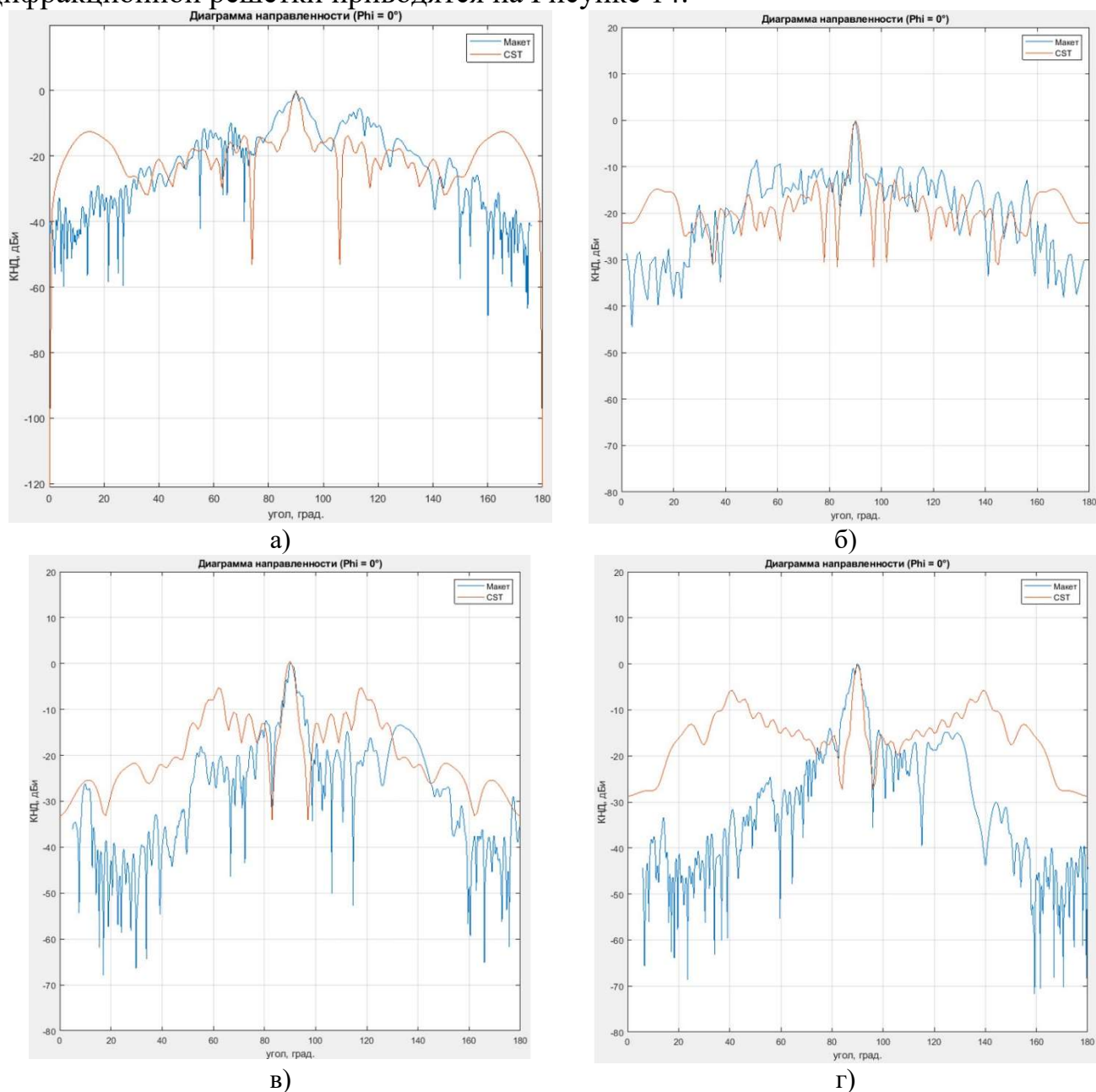


Рисунок 14 – Результаты измерений ДН при осуществлении угломестного сканирования в сравнении с расчетными значениями антенны в зависимости от частоты и периода: а) период решетки 13 мм, частота 11 ГГц; б) период решетки 13 мм, частота 12 ГГц; в) период решетки 22 мм, частота 11 ГГц; г) период решетки 22 мм, частота 12 ГГц

Полученные в результате измерений ДН имеют форму близкую к расчетным, изготовленное антенное устройство демонстрирует узкий луч, имеющий ортогональную ориентацию и малый уровень боковых лепестков. Небольшие отклонения главного луча ДН от направления, составляющего 90° , связаны с погрешностями измерений макета. Рассмотрим ДН антенного устройства при осуществлении азимутального сканирования, результаты проведенных измерений представлены на Рисунке 15.

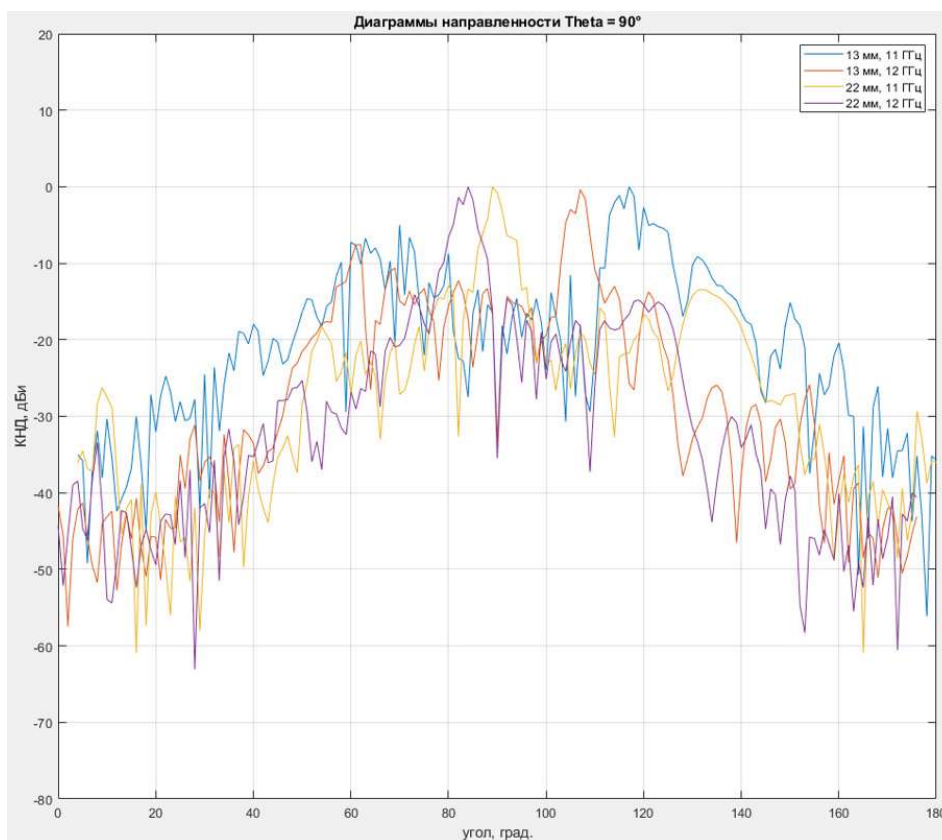


Рисунок 15 – Результаты измерений ДН при осуществлении азимутального сканирования в зависимости от частоты и периода

Полученные ДН демонстрируют возможность применения антенного устройства для осуществления частотного сканирования в угловом секторе от 85° до 115° в полосе частот от 11 ГГц до 12 ГГц и изменении периода дифракционной решетки от 13 мм до 22 мм, при этом сохраняется узкая форма главного луча.

Результаты натурных испытаний макета антенного устройства демонстрируют соответствие расчетным значениям, при этом существует возможность корректировки макета, для обеспечения улучшения результатов работы устройства.

В заключении формулируются основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертации были разработаны и исследованы конструкции антенных решеток с широкоугольным однокоординатным и двухкоординатным сканированием, предназначенных для использования в комплексах радиолокации и системах спутниковой связи. Особенности предлагаемых конструкций является простота реализации, сканирование в широком секторе углов и обеспечение снижения влияния эффекта затенения.

Основными результатами диссертации являются:

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий в сфере антенных устройств, обеспечивающих однокоординатное и двухкоординатное частотно-коммутационное сканирование. В роли проводящих ЭМВ структур были выбраны разновидности диэлектрических волноводов. Пара соединенных планарных волноводов с металлическим перфорирован-

ным экраном образуют плоскую цилиндрическую линзу Люнеберга. Были исследованы основные характеристики линзы Люнеберга, а также выбраны оптимальные характеристики линзы для формирования структуры антенны спутниковой связи. Показаны методы стратификации линзы Люнеберга и ее применение в целях осуществления широкоугольного сканирования без эффекта затенения.

2. Разработаны и исследованы конструкции щелевых волноводов с внутренними замедляющими системами, обеспечивающие возможность частотного сканирования. Были получены основные характеристики волноводов, продемонстрирована возможность формирования замедляющих систем с применением диэлектрических материалов. Продемонстрированы основные характеристики антенной решетки на основе массива волноводов.

3. Разработана и исследована антенная решетка на основе плоской линзы Люнеберга и прямоугольных щелевых волноводов, имеющих внутренние замедляющие системы. Полученная модель антенной решетки демонстрирует возможность осуществления двухкоординатного сканирования. Антенная система обеспечивает частотное сканирование на основе структуры, состоящей из волноводов, и коммутационное на основе линзы Люнеберга, осуществляя управление ДН в широком азимутальном секторе. На основе конструкции антенного устройства может быть сформирована антенная система в полном азимутальном секторе сканирования.

4. Были проведены натурные испытания макета планарной антенны на основе диэлектрического волновода и дифракционной решетки. В процессе изготовления применялись технологии электродинамического моделирования для определения влияния применяемых материалов на характеристики. У изготовленного макета были произведены измерения основных характеристик антенны в рабочем режиме.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации автор видит в улучшении характеристик и оптимизации конструкции антенных устройств, повышению направленных свойств антенн. Применение разработанных конструкций позволяет реализовать высокоэффективные, дешевые и надежные антенные системы для комплексов радиолокации и систем спутниковой связи.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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. Полноразмерная антенна Choke ring для GPS-GLONASS с рабочей полосой частот от 1.55 ГГц до 1.62 ГГц / Р. М. Ляпунов, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин Д.К. Проскурин, **Н.Б. Смольянов** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 2. – С. 182-186. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.2.028. – EDN JDTLRN.

3. Исследование антенны GPS-GLONASS для полосы частот от 1.55 до 1.62 ГГц / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, И. В. Попов, Д.К. Проскурин, **Н.Б. Смольянов** // Теория и техника радиосвязи. – 2024. – № 4. – С. 54-64. – EDN RIPILH.

1. 4. Исследование конических спиральных антенн с полусферической и сферической зонами формирования диаграммы направленности для аппаратуры дистанционного мониторинга физиологических параметров операторов / Д.В. Журавлёв, Д.К. Проскурин, Ю.Г. Пастернак, **Н.Б. Смольянов** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2026. – Т. 22. № 2. – С. 119-124. – DOI 10.36622/1729-6501.2026.22.2.015.

5. Антенные решетки с механическим широкоугольным сканированием для аппаратуры передачи энцефалограмм и кардиограмм операторов / Д. В. Журавлев, Д. К. Проскурин, Ю. Г. Пастернак, **Н. Б. Смольянов** // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2026. – Т. 22, № 1. – С. 177-182. – DOI 10.36622/1729-6501.2026.22.1.022. – EDN ZLKQGC.

6. Использование активного метаматериала для формирования сканирующей антенны / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, **Н. Б. Смольянов**, С. М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 3. – С. 71-75. – EDN UBSEPR.

7. Антенная решетка из сегменто-параболических элементов с частотным сканированием в угломестной плоскости / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов**, С. М. Федоров // Теория и техника радиосвязи. – 2025. – № 1. – С. 76-81. – EDN BGUJOC.

Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций и другие публикации:

1. Современные тенденции развития антенных систем основанных на линзе Люнеберга / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов** // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 272-277. – EDN AONDBC.

2. Антенная система с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга, состоящей из концентрических колец и ТЕМ-рупора с экспоненциальным законом распределения волнового сопротивления в радиальном направлении / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов** // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 379-385. – EDN GTWIEF

3. Журавлев Д. В. Кросс-диполь с широкой диаграммой направленности для аппаратуры контроля физиологических параметров операторов / Д. В. Журавлев, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов** // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 21–23 апреля 2026 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2026. – С. 208-214.

4. Применение змейкового волновода для частотного управления положением диаграммы направленности в пространстве / **Н. Б. Смольянов**, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воронеж, 18–20 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 241-246. – EDN CAUUFZ.

5. Разработка прямоугольного волновода с поперечной ребристой структурой и периодической решеткой щелей для сканирования в широком секторе обзора в полосе частот 10.4-12.15 ГГц / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов** // 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. 273-278. – EDN UXGATN.

6. Реализация диаграммообразующего устройства на основе апланатической линзы / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин **Н. Б. Смольянов**, С. М. Федоров // 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. – EDN WWEBME.

7. Разработка и исследование планарной антенны с широкоугольным механическим сканированием / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, **Н. Б. Смольянов** // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2024 года. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – С. 225-230. – EDN AOTQCC. Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин, Н. Б. Смольянов, / RLNC 2024, С. 225-230.

Патенты РФ:

1. Патент № 2849713 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 13/16, H01Q 21/29. Планарная антенна с широкоугольным механическим сканированием: заявл. 18.03.2025: опубл. 28.10.2025 / **Н. Б. Смольянов**, В. А. Пендюрин, Ю. Г. Пастернак, Д. К. Проскурин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". – EDN AOJACU.

Подписано в печать 08.10.2026

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л.: 1,25. Тираж 80 экз. Заказ №

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