

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Проскурин Дмитрий Константинович

Воронеж – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Анализ современного состояния и будущего направления развития теории, методов и технологий производства антенных решеток с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием	15
1.1 Общие концепции построения антенных решеток, обеспечивающих частотное сканирование в широком азимутальном секторе. Сферы применения. Типы решеток. ...	16
1.2 Многолучевые антенные решетки с широкоугольным сканированием на основе линзы Люнеберга.....	20
1.3 Линейные волноводно-щелевые антенные решетки с внутренними замедляющими системами типа периодическая «гребенка» и с каналом в форме меандра	32
1.4 Линейные дифракционные антенные решетки на основе планарных антенн	37
1.5 Выводы по первой главе	41
2. Исследование и разработка перспективных путей построения фазированных антенных решеток на основе технологии плоской линзы Люнеберга.....	42
2.1 Линза Люнеберга. Основные качества и характеристики	43
2.2 Структура плоской двуслойной линзы Люнеберга.....	45
2.3 Практическая реализация линзы Люнеберга и проблемы конструирования антенных решеток на ее основе	47
2.4 Исследование и разработка многолучевой антенны для систем спутникового позиционирования на основе двуслойной цилиндрической линзы Люнеберга.....	49
2.5 Антенные устройства для комплексов спутниковой связи, обеспечивающая работу в широком азимутальном секторе.....	54
2.6 Методика реализации построения фазированных антенных решеток на основе реализации технологии плоской линзы Люнеберга	64
2.7 Выводы по главе второй.....	65
3. Исследование и разработка линейных антенных решеток на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования	67
3.1 Замедляющие волноводные системы типа периодическая «гребенка»	69

3.2	Прямоугольные волноводы с замедляющей системой на основе канала в форме меандра.....	73
3.3	Проектирование линейной антенной решетки с внутренними замедляющими системами	77
3.4	Многочувствительные антенные решетки на основе квадратных волноводов с внутренними структурами для обеспечения круговой поляризации.....	79
3.5	Исследование и разработка конструкции антенных решеток на основе линзы Ротмана и волноводно-щелевых элементов с внутренними замедляющими системами.....	88
3.6	Методика реализации антенных решеток на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования	96
3.7	Выводы по главе третьей	98
4.	Исследование и разработка антенных устройств с частотным сканированием на основе планарных элементов	100
4.1	Построение ленточной решетки на основе антенны вытекающей волны.....	100
4.2	Варианты конструкции антенных устройств с однокоординатным угломестным электронным сканированием	105
4.3	Планарная антенна на основе диэлектрического волновода с механическим широкоугольным сканированием и управляемой ДН	128
4.4	Измерение характеристик макета антенны на основе планарного волновода.....	132
4.5	Методика реализации антенных устройств с частотным сканированием на основе планарных элементов	138
4.6	Выводы по главе 4	139
	Заключение	141
	Список сокращений и условных обозначений.....	143
	Список литературы	144
	Приложение А	164

Введение

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. Поэтому 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 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 диаграммы

направленности 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. Калиничев, В.А. Калошин, 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 канала в форме меандра, связанных 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 волноводно-щелевой антенной решетки на основе 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 диаграммы направленности. 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 диаграммы направленности (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 диаграммы направленности; 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 сложных 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 ДН. 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 математического 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 рисунок и 2 таблицы.

1. Анализ современного состояния и будущего направления развития теории, методов и технологий производства антенных решеток с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием

Антенные системы, обеспечивающие широкоугольное сканирование, в сфере технологий радиолокации, спутниковой и сотовой связи, в настоящее время представлены устройствами различных типов. Работы в данном направлении обусловлены необходимостью модернизации уже существующих систем и разработкой новых устройств, что связано с непрерывным техническим прогрессом, а также такими факторами, как:

- развитие отечественных отраслей производства, науки и технологий в условиях импортозамещения;
- наличие потребности в совершенствовании уже существующих радиотехнических систем;
- обеспечение антенными устройствами двойного назначения военной и гражданской сферы техники;
- необходимость создания спутниковых систем геопозиционирования военного и гражданского назначения, обеспечивающих высокую точность определения местоположения;
- увеличение роли БПЛА в структуре современной армии и как следствие потребность в массовых и дешевых средствах обнаружения, управления и подавления дистанционно управляемых аппаратов.

Антенные устройства, обладающие возможностью частотного сканирования в широком секторе обзора, являются одним из актуальных направлений исследований и развития техники. На разработки отечественных технологий в данной сфере накладывает ограничения отсутствие либо недостаток необходимых технологий производства и недоступность иностранных электронных компонентов. Помимо этого, высокая стоимость отечественных разработок зачастую делает их не

конкурентноспособными в отношении зарубежных устройств, поэтому важным фактором является стоимость и возможность организации производства.

Разрабатываемые радиоэлектронные системы должны обеспечивать высокие характеристики приема и передачи сигналов, а также соответствовать требованиям, устанавливаемым специфическими условиями эксплуатации устройства.

1.1 Общие концепции построения антенных решеток, обеспечивающих частотное сканирование в широком азимутальном секторе. Сферы применения. Типы решеток.

Фазированные антенные решетки (ФАР) являются одним из ключевых направлений исследования и разработки в сфере радиотехнических устройств. Они широко применяются в системах спутниковой и сотовой связи и являются незаменимыми в радиолокационных комплексах. ФАР обеспечивают возможность эффективно работать системам, действующим в широком азимутальном секторе, а также способны формировать несколько независимых лучей ДН, позволяющих вести «сопровождение» цели во всем секторе обзора без поворота антенного устройства.

Мобильные устройства связи являются неотъемлемой частью повседневной жизни, поэтому для осуществления их бесперебойной работы требуется формирование обширных сотовых сетей. Для обеспечения качественной связи, антенные устройства должны обладать высокой скоростью приема и передачи сигналов в широкой зоне покрытия сети.

Одной из основных технологий, применяемых в современных сотовых сетях, является MIMO технология (Multiple Input Multiple Output) – множественный вход множественный выход. Данная технология представляет собой объединение в единый массив двух, четырех, либо кратное большее число антенных устройств с целью увеличения полосы пропускания, а также обеспечения возможности формирования нескольких сканирующих лучей. В настоящее время стали широко распространяться сети сотовой связи пятого поколения (5G), основой которым служит миллиметровый

диапазон волн, поэтому антенные устройства, действующие в данном диапазоне, вызывают наибольший интерес к исследованию и развитию.

Наиболее существенным недостатком ФАР является их конструкция, представляющая собой массив из множества элементов, требующий необходимость формирования системы питания большого размера. При этом увеличивается вероятность выхода из строя отдельных частей ФАР. Данные недостатки возможно обойти с помощью пассивного фокусирующего элемента типа «линза».

Для формирования узконаправленных ДН в радиотехнике активно применяются диэлектрические линзы. Применение линзы из диэлектрического материала для передачи сигнала позволяет обеспечить формирование нескольких независимых друг от друга лучей. В приемных устройствах линзы обеспечивают направление различных поступающих сигналов в определенные точки фокальной поверхности. Благодаря этим качествам линзовых антенн становится возможным формирование приемо-передающих систем, обладающих высокой эффективностью работы и малым числом элементов, таким образом снижая энергопотребление и вероятность возникновения неисправностей устройства среди передающих элементов.

В настоящее время многолучевые АР, имеющие в составе конструкции диэлектрические линзы, получили распространение. Для формирования ФАР, наиболее подходящим вариантом является линза Люнеберга, физические свойства которой позволяют проектировать высокоэффективные многолучевые антенные решетки (МАР).

Авторы статьи [1] рассматривают вариант построения МАР на основе линзы Люнеберга для организации сотовых сетей пятого поколения. В работе рассматриваются преимущества реализации технологии Massive MIMO с линзой Люнеберга в составе конструкции АР. На Рисунке 1.1 представлена схема системы MU-MIMO.

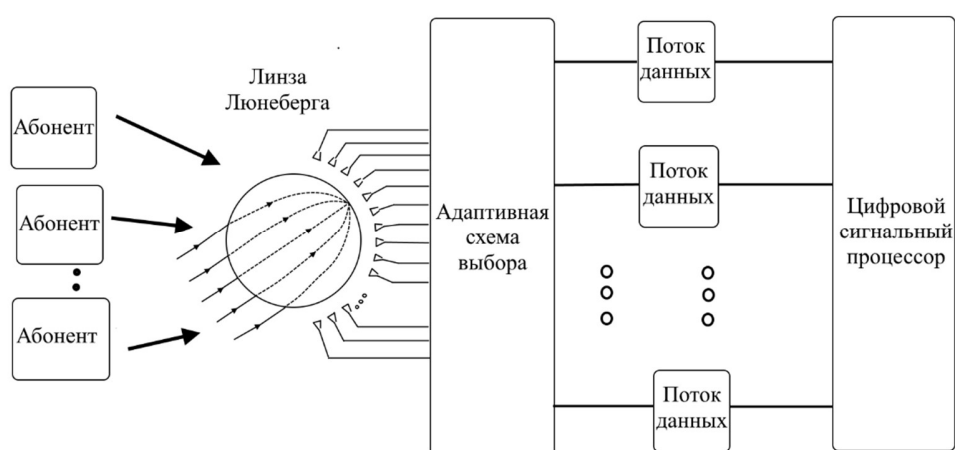


Рисунок 1.1 – Схема системы MU-MIMO с многолучевой сферической линзовой антенной

Рассматриваемый вариант антенного устройства способен обеспечить уменьшение числа вычислений и сохранить высокую эффективность, при применении цифровой обработки сигналов. Другим преимуществом приведенного в работе антенного устройства является возможность определения местоположения мобильных объектов, с возможностью управления излучением для снижения помех и улучшения характеристик сигнала.

При конструировании АР на основе линзы Люнеберга, для работы в миллиметровом диапазоне длин волн, применяемый в сетях 5G, диаметр линзы будет составлять около 15-20 см. Компактные размеры устройства позволяют проводить их установку в городской среде при минимальном занимаемом пространстве [2]. В свободном пространстве потери увеличиваются пропорционально квадрату частоты волны, что вызывает определенные ограничения на расстояние передачи сигналов, даже без учета препятствий на пути распространения. Формирование разреженности путей распространения сигналов в городском пространстве в сочетании с антенным устройством на основе фокусирующей диэлектрической линзы представлено на Рисунке 1.2.

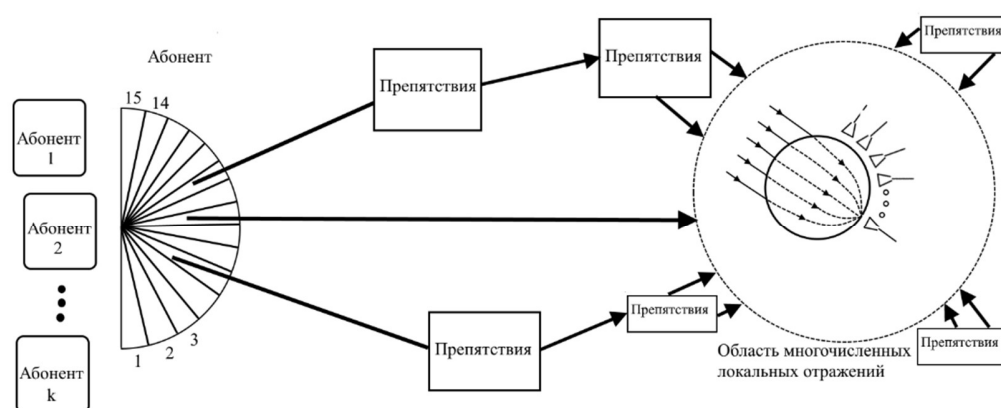


Рисунок 1.2 – Разреженность в пространстве путей распространения сигналов миллиметрового диапазона в сочетании с узконаправленной линзовой антенной

В целях улучшения линий радиосвязи, имеет место применение антенных устройств представляющих собой рупорную антенну, в раскрыве которой устанавливается линза Лüneберга. Включение линзы в состав конструкции рупора, улучшает ДН на высоких частотах рабочего диапазона, уменьшая боковые и задние лепестки на частотах выше 12 ГГц [3]. Помимо этого, подобное устройство создает возможность организации узконаправленных линий беспроводной связи, формирующих кластеры передачи данных, сформированные на основе антенных устройств со сферической линзой Лüneберга. Свойства линзы Лüneберга позволяют сформировать узкую ДН для каждого из расчетных направлений, в результате чего образуется сфера, состоящая из нескольких направленных антенн, обладающих ориентацией по азимуту и углу местности [4]. В работе [5] рассматривается синтез пассивной антенной решетки и МАР с цифровым диаграммообразованием. Второй вариант имеет больше перспектив, в сравнении с первым, в связи с невозможностью плотного покрытия сканируемой области при низком уровне боковых лепестков.

В статье [6] авторы работы производят расчет характеристик единичного микрополоскового элемента для АР. Предлагаемый вариант АР обладает высокими значениями коэффициента усиления, однако важным недочетом, подобной АР

является отсутствие сохранения направления лучей в случае изменения частоты, при параллельной схеме питания. Помимо этого, нужно отметить, что выход из строя единичных элементов АР повлечет за собой нарушение работы всего устройства.

Авторы статьи [7] в своей работе касаются важной темы формирования частотно-независимых характеристик излучения в широкой полосе рабочих частот, рассматриваются характеристики ДН в зависимости от формы раскрыва антенного устройства. Наибольшей проблемой при проектировании МАР становится обеспечение сохранения на одном уровне амплитудного распределения в полосе рабочих частот. При этом формирование фазовых распределений возможно организовать через подбор электрической длины соединительных линий передачи между диаграммообразующим устройством и группами элементов излучающей решетки.

В работе [8] авторы рассматривают возникновение помех, а также возможность их специальной постановки. В этих целях применяются уголкового, линзовые и пачки дипольных отражателей. Линзы Люнеберга используются в линзовых отражателях в целях формирования областей засветки на радарх увеличивая эффективную площадь рассеивания (ЭПР) объектов.

1.2 Многолучевые антенные решетки с широкоугольным сканированием на основе линзы Люнеберга

Автор статьи [9] в своей работе рассматривает возможность применения линзы Люнеберга в составе радиолокационного отражателя, элемента навигационных знаков, применяемых при судоходстве. Схематическое изображение радиооптического отражателя-излучателя приведено на Рисунке 1.3.

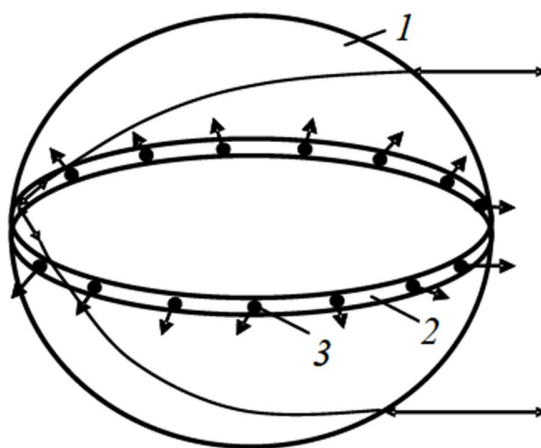


Рисунок 1.3 – Схема радиооптического отражателя-излучателя на основе линзы Люнеберга с экраном, расположенным в сечении экваториальной плоскостью:

1) линза; 2) рассеивающий обруч; 3) источник света

Структура линзы состоит из нескольких однородных слоев, обладающих различной диэлектрической проницаемостью. Индикатриса обратного рассеяния отражателя-излучателя зависит от формы экрана, установленного на линзе. Топология визуальных индикаторов, для определения положения радиооптического отражателя-излучателя зависит от расположения экрана.

Антенные устройства на основе линзы Люнеберга получили широкое распространение в области спутниковых систем. Одним из элементов ГЛОНАСС являются геодезические пассивные спутники с помощью которых обеспечивается высокоточная лазерная дальнометрия. Эти спутники обладают существенным недостатком. Они выполнены в виде сферических конструкций, несущих на своей поверхности массив угловых отражателей. По этой причине возникают погрешности измерения, обусловленные искажением формы отраженного сигнала и погрешностью привязки результатов измерения дальности к центру масс спутника [10]. Данные недостатки возможно обойти с помощью внедрение сферической линзы Люнеберга в состав конструкции спутниковой антенны. Физические свойства линзы позволяют обеспечить фокус плоской волны, падающей на поверхность линзы, на

противоположную сторону сферы, снабженной отражающим покрытием. В случае необходимости увеличения числа лучей ДН в азимутальной и угломестной плоскостях, форма линзы Люнеберга помимо сферической, может принимать вид полусферы, либо цилиндра, для получения большего числа ДН в азимутальной плоскости.

В статье [11] автором сравниваются несколько диаграммообразующих систем способных обеспечить работу многолучевой антенны. Широкое распространение в радиотехнике имеют системы, базой которым выступают матрицы Батлера, Бласса, а также линзы Ротмана. Данные варианты являются хорошо изученными и очень распространенными в антенной технике, однако обладают существенными недостатками. Линзы Ротмана, например, занимают значительную площадь, а также вносят существенные тепловые потери. Линза Люнеберга позволяет проектировать различные конструкции антенных устройств, обеспечивая высокие характеристики без изменения формы ДН в широком угловом секторе обзора.

В работе [12] авторы касаются темы перспективы развития антенных систем с переменными показателями преломления. На Рисунке 1.4 представлены результаты электродинамического моделирования многослойной линзы Люнеберга.

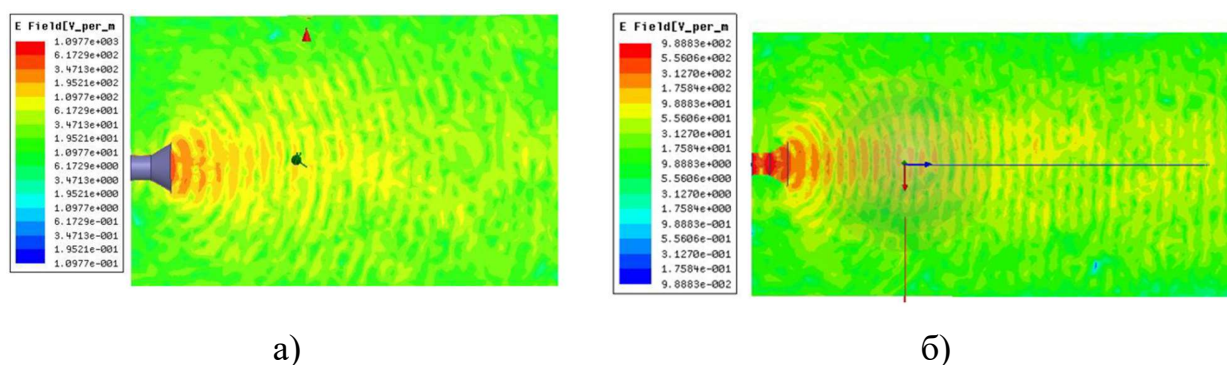


Рисунок 1.4 – Модель излучения: а) без линзы Люнеберга; б) с линзой Люнеберга состоящей из 5 слоев

По изображениям, представленным в статье, можно увидеть, что происходит преобразование сферического фронта волны в плоский, за счет ее прохождения через неоднородную среду, состоящую из нескольких слоев линзы.

В статье [13] рассматривается применение линзовых МАР для комплексов РЛС. Основным достоинством таких устройств указывается возможность построения осесимметричных систем без возникновения эффекта затенения, что вместе с широким сектором обзора антенны до 160° , позволяет обеспечить высокие характеристики радиолокационных комплексов и станций спутниковой связи наземного базирования.

Серьезным недостатком линзовых антенн указывают отражение волн от граничных поверхностей, диссипативные потери в диэлектрике, большую массу, а также сложность и высокую стоимость изготовления линз [13]. Вариантом исполнения линзовой антенны является многолучевая антенная система РЛС «Неман», она представлена на Рисунке 1.5.

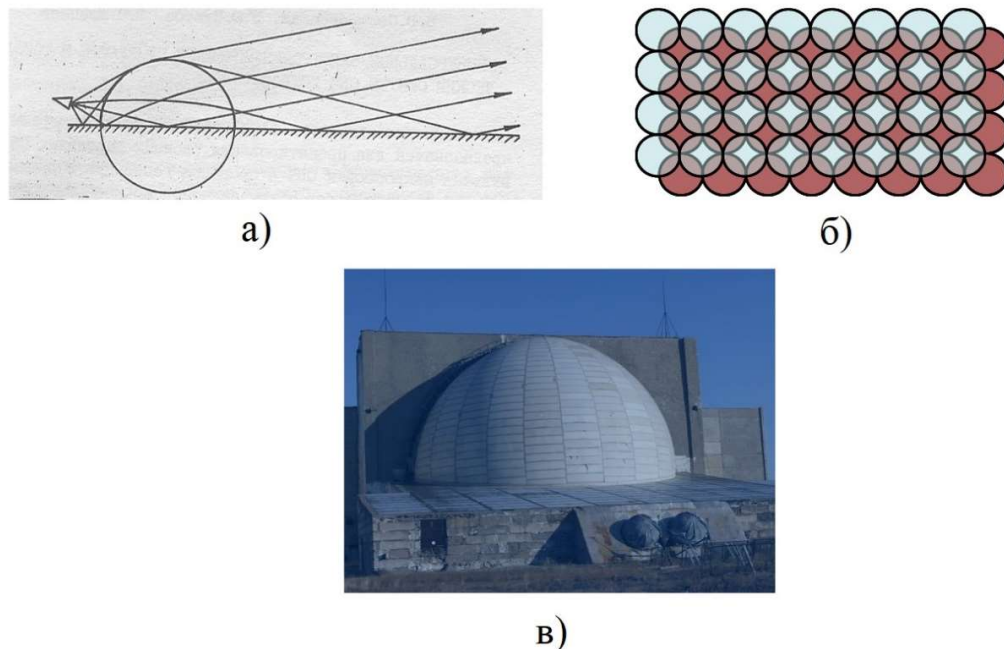


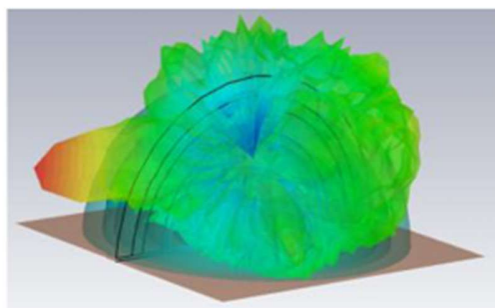
Рисунок 1.5 – Приемная многолучевая антенная система РЛС «Неман»:
а) распространение лучей в структуре линзы; б) схематическое изображение
решетки облучателей РЛС; в) внешний вид антенного устройства РЛС

Пример хода лучей в сферической структуре линзы представлен в геометрическом виде на Рисунке 1.5 (а). Для обеспечения высокой плотности лучей ДН система РЛС включает две решетки облучателей, принцип их расположения представлен на Рисунке 1.5 (б). Рассматриваемая антенная система выполнена из блоков пенополистирола и пенокерамики, поверхность комплекса имеет радиопрозрачный экран, защищающий конструкцию от неблагоприятных условий. Антенное устройство под защитным экраном представлено на Рисунке 1.5 (в).

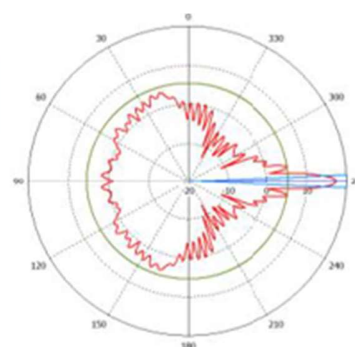
Авторы работы [14] представляют вариант ФАР, конструкция которой базируется на полусферической многослойной линзе Лüneберга. Данный вариант антенного устройства отличается малыми габаритными размерами и массой, при этом форма антенны позволяет обеспечить изменяемый секторный обзор в полной азимутальной плоскости (до 360°). Диапазон рабочих частот устройства от 4 до 7 ГГц. Конструкция антенны представляет собой структуру, состоящую из полусферических осесимметричных деталей, изготовленных из диэлектрических материалов, разделяемых воздушными зазорами, располагающимися между стенками полусфер. Толщина зазоров и стенок изменяется согласно закону, описывающему распределение диэлектрической проницаемости многослойной линзы Лüneберга [15]. Другой важной частью антенного устройства является ФАР, состоящая из множества тонкопроволочных вибраторов с рефлекторами, установленными на диэлектрической подложке вокруг линзы. На Рисунке 1.6 приводится изображение макета антенны и результаты моделирования ДН на частоте 6 ГГц.



а)



б)



в)

Рисунок 1.6 – МАР на основе полусферической линзы Люнеберга: а) макет антенного устройства; б) результаты моделирования ДН на частоте 6 ГГц в трехмерном виде; в) ДН и двумерном виде

Предлагаемая авторами работы модель антенного устройства по результатам моделирования демонстрирует значение коэффициента усиления в пределах 5 – 12 дБ. Данный уровень усиления позволяет обеспечить необходимый уровень связи, что в сумме с компактными размерами и небольшой массой устройства позволяет использовать его в комплексах, связанных с мобильными объектами.

Помимо высоких качественных характеристик линзы Люнеберга, в настоящее время появились новые перспективы применения данной технологии, благодаря широкому распространению в последние годы технологии трехмерной печати.

Благодаря этому, возможность проектирования диэлектрических линз стала доступной большому числу разработчиков.

В работе [16] представляется вариант линзы Люнеберга имеющий форму сферического многогранника Голдберга. Данная модель линзы имеет радиальную симметрию и возможность масштабирования. Благодаря геометрии ячеек и форме линзы, модель обладает высоким уровнем механической прочности, а также не требует дополнительных вспомогательных элементов для поддержки конструкции. Модель рассматриваемой линзы представлена на Рисунке 1.7.

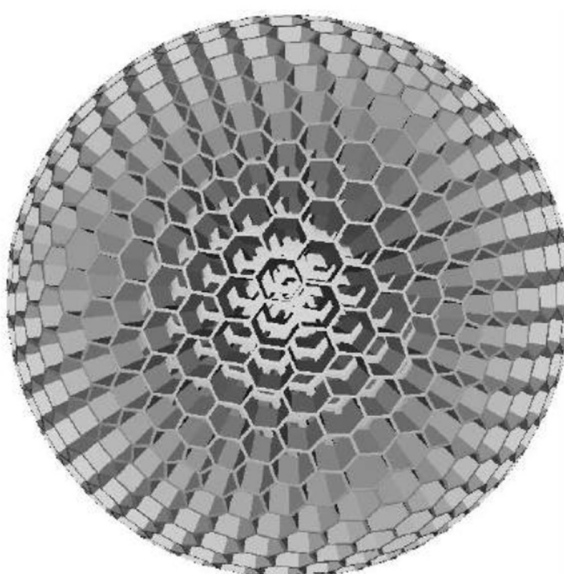


Рисунок 1.7 – Модель линзы Люнеберга в форме многогранника Голдберга

Модель линзы обладает определенными размерами шестиугольников и толщиной стенок между ними. Данная структура позволяет обеспечить требуемый уровень диэлектрической проницаемости слоев. Спроектированная модель при работе на частоте 10 ГГц демонстрирует значение коэффициента диэлектрической проницаемости от 2.7 до 1.4 в зависимости от уровня заполнения – от полного заполнения до сетки, состоящей из шестиугольных отверстий с длиной стороны 4.65 мм. Такие значения позволяют сформировать требуемые изменения диэлектрической проницаемости при ступенчатом способе формирования слоев линзы Люнеберга.

В статье [17] описываются и сравниваются два варианта линзы Лüneберга: из однородного материала диэлектрика и образец с перфорацией слоев. Авторами работы были проведены натурные измерения макетов линзы Лüneберга в диапазоне частот от 18 ГГц до 26 ГГц. На Рисунке 1.8 наглядно демонстрируется разница заполняемости ячеек, образующих структуру линзы, обеспечивающих разные значения коэффициента диэлектрической проницаемости.

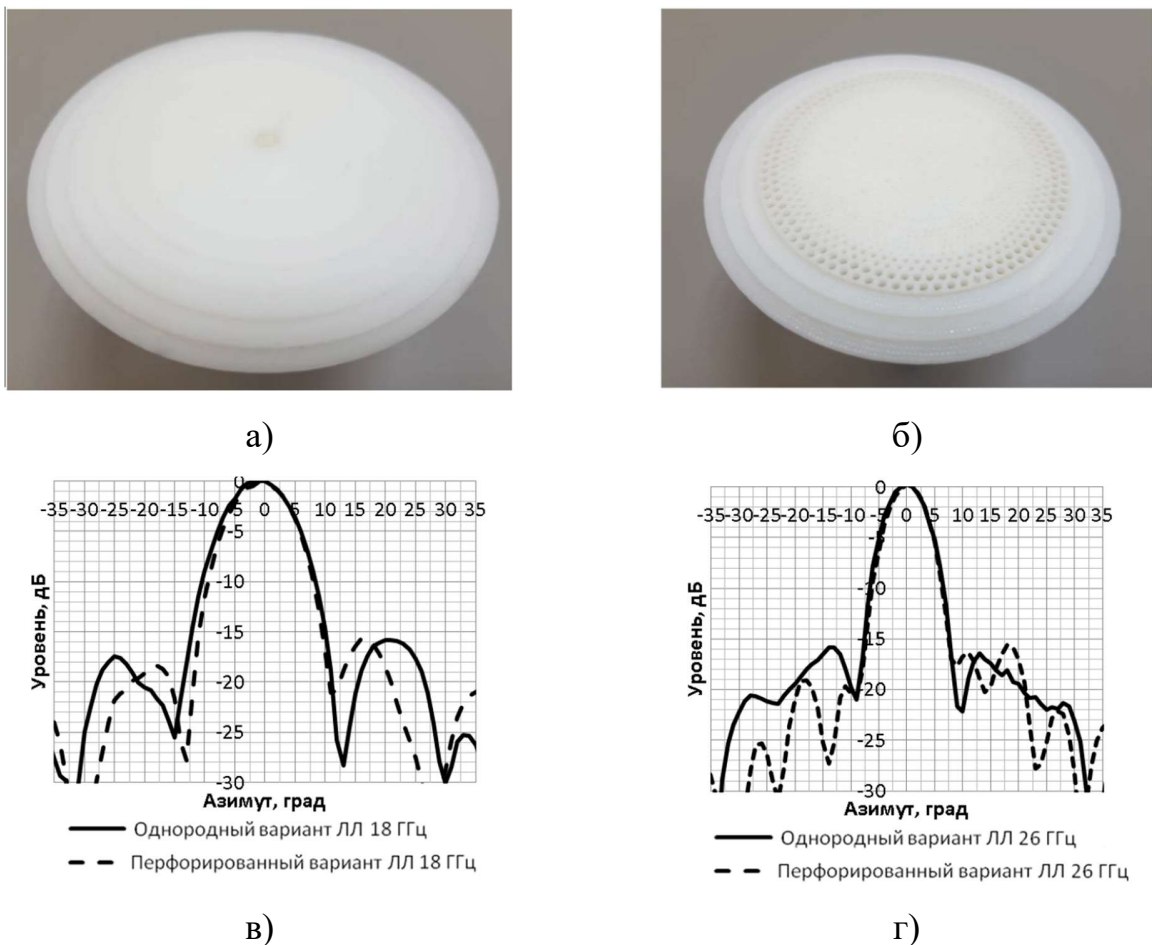


Рисунок 1.8 – Макеты линзы Лüneберга и ДН, полученные в результате натурных испытаний: а) макет линзы из однородного материала; б) макет линзы из перфорированного материала; в) ДН полученные на частоте 18 ГГц; г) ДН полученные на частоте 26 ГГц

В работе [18] производится анализ возможности конструирования линзы Лüneберга. Автор указывает, что при разработке структуры многослойной линзы

необходимо учитывать механические свойства материалов, чтобы конструкция была устойчива к внешним воздействиям. Наиболее устойчивой структура многослойной линзы будет в случае применения одного материала, с различной плотностью, что позволит обеспечивать требуемую диэлектрическую проницаемость слоев. Диэлектрическая проницаемость внешнего слоя линзы стремится иметь уровень близкий к единице. Для получения такого значения, внешний слой будет обладать низкой плотностью, из-за чего этот слой будет хрупким. Современные аддитивные технологии позволяют добиться требуемых значений заполнения, добавляя перфорацию в материале, но это требует особых настроек печати, в связи с высоким уровнем погрешности при изготовлении.

В работе [19] описывается концепция построения МАР для диапазона рабочих частот от 24.25 ГГц до 27.5 ГГц. В качестве облучателей предлагается ряд волноводов с двумя коаксиально-волноводными переходами. Фокусное расстояние составляет $1.1R$ относительно радиуса линзы Лüneберга, что позволяет организовать установку 8 облучателей, с шириной лучей 11.8° - 10.2° и уровнем боковых лепестков (УБЛ) -21 дБ.

В статье [20] авторы демонстрируют результаты расчета и моделирования линзы Лüneберга, состоящей из 29 слоев диэлектрика. Параметры слоев линзы получены методом параметрической оптимизации. Характеристики линзы позволяют получить хорошие показатели усиления, при малых значениях УБЛ во всем секторе сканирования антенны. Моделирование конструкции в виде половины линзы, с установленным металлическим экраном, по результатам расчета, демонстрирует параметры излучения имеющие незначительные отличия от полученных при моделировании цельной линзы.

В статье [21] авторами работы рассматривается вариант квазисферической линзовой антенны на основе линзы Лüneберга и зависимости характеристик от параметров дискретизации. На Рисунке 1.9 представлена модель плоскостойной линзы Лüneберга.

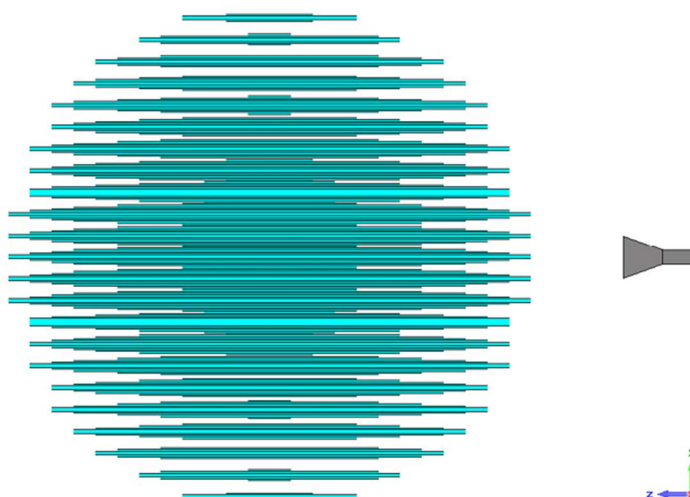


Рисунок 1.9 – Сечение квазисферической плоскостлой линзовой антенны

Число дискретов толщины, необходимой для получения высокой эффективности использования апертуры линзы, находится в зависимости от размеров самой линзы. При наличии ограничения на создание слоев с малым периодом, возможно обеспечение сохранения характеристик ДН на требуемом уровне, при работе в резонансной области частот и ограниченном секторе сканирования.

В статье [22] авторы приводят результаты моделирования и экспериментальных исследований антенных элементов созданных с помощью аддитивных технологий. Данным способом были изготовлены цилиндрическая линза Люнеберга, имеющая перфорацию диэлектрического материала, а также линза со ступенчатой аппроксимацией закона изменения диэлектрической проницаемости в цилиндрической линзе Люнеберга для полосы частот от 18 ГГц до 26 ГГц. Цилиндрические линзы по результатам натурных испытаний демонстрируют формирование главного луча ДН шириной до 7.4° . На Рисунке 1.10 приводится график полученной в результате эксперимента частотной зависимости коэффициента усиления.

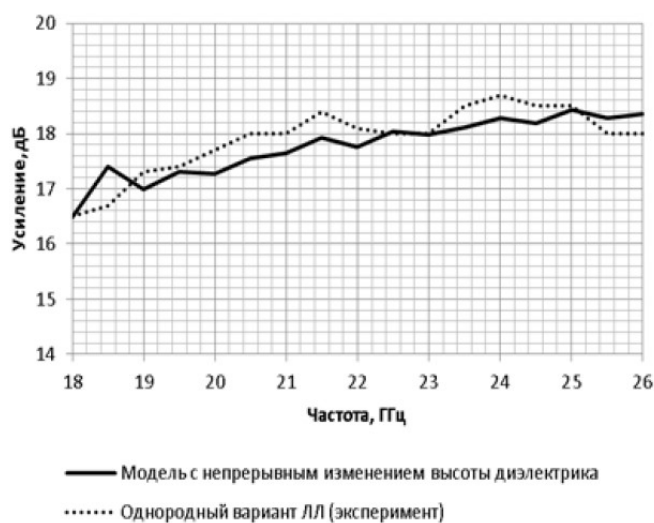


Рисунок 1.10 – Частотная зависимость КУ печатной цилиндрической линзы Люнеберга

Одним из недостатков сферической линзы Люнеберга является ее геометрическая форма, и связанная с этим сложность установки на ее поверхность излучающих элементов. Вариант устранения данного недостатка указывается в работе [23]. В работе описывается способ синтеза диэлектрической линзы сферической формы, с изменением одной из сторон сферы в плоскую поверхность с помощью метода квазиконформных оптических преобразований. Данный вариант конструкции линзы позволяет упростить размещение излучателей, но увеличивает уровень боковых лепестков ДН при широком угле сканирования, либо значительно уменьшает значение азимутального угла сканирования.

В статье [24] автором рассматривается вариант конструкции двухслойной планарной линзы Люнеберга для обеспечения сканирования в секторе, составляющем 360° . Форма линзы Люнеберга, конструктивно позволяет добиться полного кругового сканирования, за счет расположения облучающих элементов вдоль контура образующей линзы, но сами облучатели, в таком случае, будут вызывать искажения лучей, идущих с противоположной стороны. Однако, существует вариант решения данной проблемы.

Структура линзы представляет собой два планарных волновода состоящих из материалов диэлектриков, при этом диэлектрическая проницаемость материалов изменяется от центра линзы к ее образующей таким образом, чтобы обеспечить преобразование цилиндрической волны в плоскую, при прохождении волной тела линзы. Другой особенностью предлагаемого варианта конструкции линзы Люнеберга является распределенная связь ПЛВ, благодаря чему волна, распространяясь по одному волноводу, постепенно переходит на верхний слой, где облучающие элементы отсутствуют. На выходной поверхности линзы возникает эффект преломления лучей из-за разницы эффективной диэлектрической проницаемости слоев.

Линза Люнеберга за счет своих физических свойств является ключевым компонентом для конструкции многих многолучевых антенн. Существует возможность приобретения серийных вариантов линзы Люнеберга, отличающихся высокими характеристиками, однако такой вариант уменьшает вариативность разработки конструкции антенных устройств. В настоящее время стали широкодоступными аддитивные технологии, благодаря чему появилась возможность более простого варианта изготовления линзы Люнеберга. Трехмерная печать позволяет ускорить разработку антенных устройств, уменьшив время этапа макетирования.

В статье [25] рассматривается вариант конструкции многолучевой антенны, имеющей в своей основе линзу Люнеберга цилиндрической формы. Конструкция антенного устройства способна сформировать сектор сканирования, составляющий до 60° в азимутальной плоскости, в полосе рабочих частот от 8 ГГц до 18 ГГц. Цилиндрическая форма линзы позволяет установить до пяти облучающих элементов, без искажения ДН. Уровень пересечения лучей многолучевой антенны находится в пределах от -2 дБ до -4 дБ, при уровне приема сигнала в направлении максимума от -7.5 дБ до -15 дБ. Результат моделирования ДН нескольких рабочих облучающих элементов представлен на Рисунке 1.11.

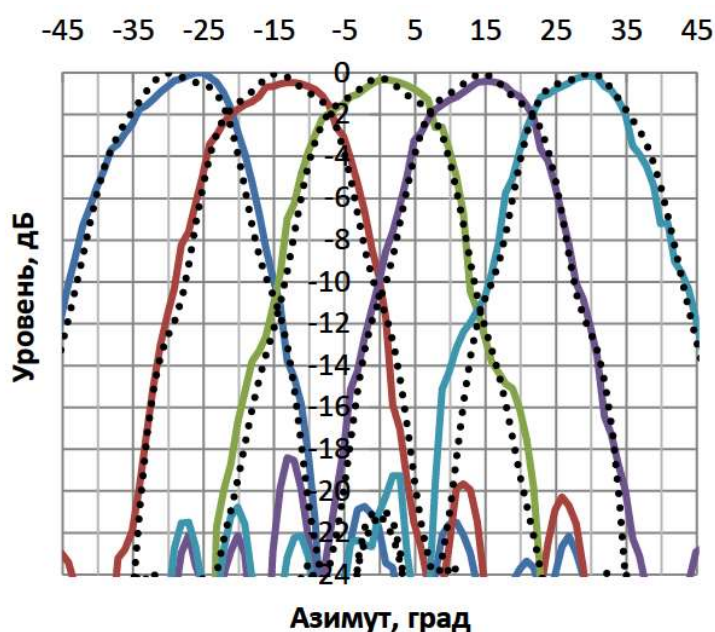


Рисунок 1.11 – Азимутальное сечение ДН на частоте 12 ГГц

Цилиндрическая форма линзы Люнеберга позволяет сформировать несколько схожих ДН в широком секторе сканирования, обеспечивая стабильные характеристики излучения.

Исследования технологии конструирования антенн на основе линзы Люнеберга являются актуальными и в настоящее время, так как остается малоисследованным ряд практических задач. Помимо этого, возможность реализации устройств с применением аддитивных технологий делают линзы Люнеберга перспективными для более широкого применения [26].

1.3 Линейные волноводно-щелевые антенные решетки с внутренними замедляющими системами типа периодическая «гребенка» и с каналом в форме меандра

Широкое распространение в СВЧ-технике имеют волноводы. С их помощью минимизируются потери при передачи электромагнитной волны от источника излучения к нагрузке. Физические свойства волноводов, помимо передачи излучения,

позволяют применять их в качестве излучающих элементов за счет дополнительных отверстий, расположенных на стенках конструкции.

Одиночная щель имеет слабовыраженные направленные свойства, поэтому, для достижения наилучших характеристик излучения, в конструкцию волноводов вводят ряды щелей. Для получения узких главных лучей ДН и увеличения КНД применяют многощелевые антенны. Наиболее применяемым типом таких антенн являются волноводно-щелевые антенны, представляющие собой систему полуволновых щелей, вырезанных в стенке волновода [27].

Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩАР) являются конструкциями, представляющими собой массив из волноводов, несущих ряды излучающих щелей. ВЩАР применяются преимущественно в качестве бортовых остронаправленных антенн. Наиболее часто применяется конструкция волновода с полуволновыми резонансными щелями, расположенными на широкой или узкой стенке прямоугольного волновода с волной типа H_{10} . [28]. Они имеют широкое распространение в современных радиоустройствах различного назначения [29], [30]. ВЩАР характеризуются низким уровнем боковых лепестков, высокой эффективностью излучения и малой перекрестной поляризацией.

В статье [31] рассматривается ВЩАР на основе прямоугольного волновода. Топология расположения щелей представляет собой ряд отверстий вдоль всей длины волновода на стороне широкой стенки. Представленная в работе модель обеспечивает сохранение величины усиления и угловое смещение оси ДН, при увеличении дисперсии, однако наблюдается повышение уровня изотропного фона и боковых лепестков.

Вариант ВЩАР на основе прямоугольного волновода представлен в работе [32]. Данное устройство обладает высоким уровнем величины коэффициента использования поверхности и широкой полосой рабочих частот. ДН в полосе рабочих частот демонстрируют минимальные изменения – коэффициент усиления имеет максимальные значения, а уровень первого бокового лепестка минимальные.

Вариант волновода с наклонными щелями, расположенными поперек узкой стенки, представлен в статье [33]. Модель волновода, имеет щели, расположенные под углом около 45° . ВЩАР демонстрирует уровень боковых лепестков ДН около -13.5 дБ, а направление излучения луча антенны соответствует нормали. При организации двумерной АР, состоящей из пары волноводов, становится возможным обеспечить снижение уровня дифракционных паразитных лепестков ниже -35 дБ. Иной вариант устранения боковых лепестков представлен в работах [34] и [35], где описывается подавление поляризованной поперечно волноводу составляющей, за счет добавления в его структуру дополнительных компонентов. Представленная в работе ВЩАР, состоящая из нескольких волноводов, установленных со смещением относительно друг друга, позволяет снизить УБЛ до -30 дБ.

С целью улучшения характеристик волноводных устройств, таких как замедление фазовой скорости или коэффициент затухания, существуют различные варианты изменения конструкции волноводов посредством внедрения замедляющих систем. В работах [36] и [37] рассматривается вариант замедления через проектирование «петляющего волновода».

Волноводы, обладающие замедляющими структурами представлены в работах [38], [39], где указывается, что наибольшей сложностью при проектировании систем является оптимизация волноведущей системы, из-за сложных граничных условий. Разработка замедляющих систем может быть упрощена за счет установки различной толщины элементов гребенки. Примеры конфигураций замедляющей системы прямоугольных волноводов представлены на Рисунке 1.12.

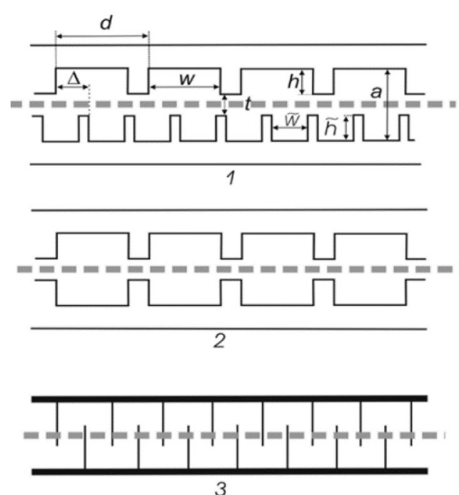


Рисунок 1.12 – Примеры прямоугольных волноводов с замедляющими системами типа гребенка в разрезе

Замедляющие системы на основе ВЩАР имеют небольшое распространение из-за сложности оптимизации волноведущей системы, связанной с ее формой и размерами. Варианты конструкции замедляющих систем могут включать в себя пластины или диафрагмы, добавленные в полость волновода. В качестве замедляющей системы может выступать волноводный канал [40], [41]. Такие конструкции часто применяются в составе ламп бегущей волны. Преимуществами петляющих волноводов являются широкая полоса усиления, высокое сопротивление связи и низкий уровень потерь в миллиметровом диапазоне [42], весомым недостатком такой системы будет сложность изготовления формы. Крупные отечественные [43] и зарубежные [44], [45] организации ведут активные разработки замедляющих систем на основе «петляющих волноводов» в полосе частот от 75 до 100 ГГц.

В статье [46] рассматривается влияние частичного заполнения диэлектрическим материалом ВЩАР на ее рабочий диапазон. Указанный способ позволяет сместить частотный диапазон вниз на 1 ГГц до полосы частот от 8 ГГц до 9 ГГц, а также получить значение КСВН не более 1.5. Помимо этого, добавление диэлектрического слоя в конструкцию ВЩАР обеспечивает дополнительную защиту системы от

неблагоприятных условий окружающей среды при сохранении согласующих свойств устройства.

В работах [47] и [48] авторами исследуются характеристики ВЦАР, обеспечивающие широкий сектор сканирования. Внутреннее пространство волноводов заполнено диэлектрическим материалом, в верхней широкой стенке волноводов прорезаны парные поперечные отверстия. Диапазон рабочей полосы частот ВЦАР составляет от 6.5 ГГц до 13 ГГц, угол излучения находится в зависимости от частоты. Ключевой особенностью данного антенного устройства является возможность осуществления сканирования в секторе, составляющем 180° . Частотное сканирование является распространенным решением при применении ВЦАР, как наиболее эффективный способ работы устройства, не требующий сложных механизмов необходимых для изменения направления сканирования. В работе [49] рассматривается частотное сканирование с помощью ВЦАР в полосе частот от 130 до 180 ГГц. Конструкция применяемых в устройстве волноводов имеет напыление, выполненное по технологии PolyStrata. Такой способ позволяет сформировать тонкий диэлектрический слой на поверхности металла, позволяющий обеспечить наилучшие характеристики работы устройства в диапазоне от 200 ГГц до 300 ГГц. Волновод с рядами щелей на широкой стенке, имеющий слой напыления, выполненный по технологии PolyStrata, представлен в работе [50]. Модель демонстрирует высокие характеристики в полосе частот от 275 до 295 ГГц.

Одним из вариантов применения замедляющих волноводов, являются устройства, представляющие собой антенны вытекающей волны (АВВ). Антенны данного типа рассматриваются в ряде работ [51-54]. Конструкция АВВ состоит из периодических структур, таких как волноводы или волноводные решетки содержащие массивы щелей. В работе [55] конструкция антенны вытекающей волны имеет миниатюрные размеры, благодаря чему ее возможно использовать в составе конструкции небольших беспилотных летательных аппаратов. Антенное устройство, имеющее основу в виде прямоугольного металлического волновода, внутреннее

пространство которого включает вставку из материала диэлектрика, имеющая парные поперечные щели в широкой стенке описывается в статье [56].

В статьях [57], [58] авторы исследуют АВВ на основе прямоугольных волноводов и влияние на их характеристики диэлектрического материала при заполнении волновода. Особенностью рассматриваемых в работах волноводов является формирование бесконечно тонких узких стенок, что обеспечивает получение наилучших характеристик. Конструкция ВЦАР позволяет формировать узкую ДН, направлением которой возможно управлять в широком секторе сканирования за счет изменения рабочей частоты.

Аналитический метод анализа антенных решеток на волноводах описывается в работах [59], [60]. Синтез устройства осуществляется в несколько этапов, расчет антенной решетки начинается с вычисления комплексной постоянной распространения вытекающей моды, результаты аппроксимируются с помощью простых аналитических функций. С помощью полученных зависимостей определяются параметры неоднородной решетки, для реализации заданного распределения поля.

В работах [61], [62] рассматриваются частотно-сканирующие волноводно-щелевые антенны. По результатам моделирования, устройства демонстрируют широкие полосы рабочих частот, что позволяет обеспечить частотное сканирование в широком угловом секторе.

В работах [63-65] рассматриваются примеры непериодических и периодических сканирующих антенн вытекающей волны на основе волноводов. Прямоугольные волноводы в составе рассматриваемых устройств демонстрируют направленное распространение волн, а их конструкция представляет собой анизотропную систему. Для формирования наименьшей ширины главного луча ДН требуется структура АР, обладающая наибольшим числом периодов вдоль основных осей периодичности.

1.4 Линейные дифракционные антенные решетки на основе планарных антенн

Одними из наиболее дешевых и простых для изготовления антенных устройств являются планарные антенны с полосой рабочих частот в диапазоне от 300 МГц до 25 ГГц. Задача проектирования линейных антенн на основе диэлектрического волновода широко рассматривается в статье [66]. Авторы описывают варианты антенн, имеющие в основе собственной конструкции желобковый диэлектрический волновод, обладающий нерегулярностями в виде пазов и металлических полосок. Помимо этого, в работе описывается решение задачи синтеза направленных свойств антенного устройства на основе расчета коэффициента связи. Авторы предлагают подход к синтезу, имеющий основу в виде представления антенного устройства, как почти периодической антенной решетки.

Конструкция плоских антенн СВЧ-диапазона может состоять из нескольких подрешеток вытекающей волны и соединенных с ними волноводов. Пример антенного устройства на основе четырех подрешеток, имеющих общий четырехканальный делитель/сумматор мощности представлен в работе [67], схожая конструкция представлена в работе [68], где плоская антенна соединяется с плоско-выпуклой апланатической линзой. По результатам имитационного моделирования, плоские антенны демонстрируют значение КНД более 23 дБ в полосе частот от 24 ГГц до 25 ГГц. Они формируют узкий главный лепесток ДН за счет большого числа периодов решетки и обеспечивают низкий УБЛ до -13 дБ в связи с перераспределением мощности бокового излучения.

Одним из вариантов исполнения конструкции линейных антенных решеток являются дифракционные решетки, структура которых состоит из тонких металлических лент, расположенных поверх слоя диэлектрического материала планарного волновода. Рассматриваемая конструкция антенного устройства, при относительной простоте изготовления, способна обеспечить высокую эффективность работы. Низкая стоимость планарных антенн делает их широко распространенными в гражданской сфере техники, например, в системах приема спутниковой связи. Недостатками ленточных планарных антенн является низкий КПД и большие

тепловые потери. Нужно отметить, что антенны, имеющие последовательное питание, обладают более высоким КПД в сравнении с антеннами данного типа на основе параллельной схемы питания.

В работе [69] авторами рассматриваются несколько моделей АВВ. Разработки устройств в данном направлении имеют перспективы развития для достижения более высоких характеристик излучения, низкого УБЛ, коэффициента усиления (КУ), а также с конструктивной точки зрения уменьшения габаритов, массы и упрощения изготовления. Параметры антенн, приведенных в работе, оптимизированы для работы в диапазонах частот 10.4 – 10.8 ГГц, 24 – 24.4 ГГц и 36.5 – 37.3 ГГц. С увеличением значения рабочей частоты уменьшаются размеры апертуры антенны, а также период и ширина полос. Рассматриваемые устройства обеспечивают узкую ДН в Е- и Н-плоскостях до 5° , высокий уровень КУ >28 дБ и УБЛ < -12 дБ. В работе [70] описывается более подробно принцип действия АВВ, на Рисунке 1.13 представлен пример конструкции антенны данного типа.

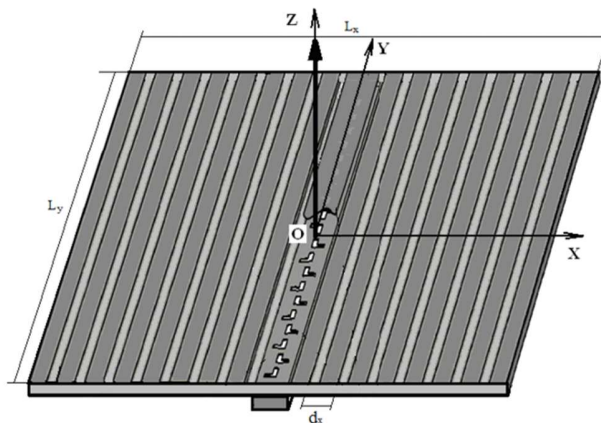


Рисунок 1.13 – Вид конструкции антенной решетки вытекающей волны

Представленное на Рисунке 1.13 устройство разработано для полосы частот 36 – 37.5 ГГц, основой конструкции устройства является диэлектрический волновод. Излучающая апертура антенны сформирована на основе ряда параллельно расположенных металлических лент. Габаритные размеры устройства составляют

104.5 мм на 108 мм. Питание устройства реализуется с помощью прямоугольного волновода со щелями связи на стороне широкой стенки.

Вариант планарной антенны на основе диэлектрического волновода описывается в патенте [72]. Антенное устройство представляет собой металлизированный диэлектрический плоский волновод, связанный с двумя металлическими волноводами, через периодическую решетку щелей в форме ромбов. Излучающие элементы располагаются в узлах ромбической сетки. Рабочая полоса частот в Ku-диапазоне составляет от 13.9 ГГц до 15.4 ГГц. В патенте [72] описывается планарная антенна на основе диэлектрического волновода, основные излучающие элементы которой, располагаются в узлах квадратной сетки. В полосе рабочих частот от 9.2 ГГц до 10.2 ГГц устройство способно обеспечить уровень усиления до 27.4 дБ.

В работе [73] рассматривается модификация конструкции планарной антенны, на основе диэлектрического волновода, и методика оптимизации ее параметров. Начальная настройка модели включает в себя выбор основных параметров ПДВ, в том числе габаритных размеров и материалов антенны. Далее, на основе предварительной модели, осуществляется выбор параметров канавок, составляющих гребенчатую решетку. После синтеза базовой модели, необходимо осуществить проверку корректности начальных параметров апертуры. Оптимизация параметров полученной в результате синтеза модели антенного устройства, по средствам электродинамического моделирования, позволяет вычислить основные характеристики: постоянную распространения волны, коэффициент отражения, ДН и прочие показатели. По результатам расчетов авторами работы представлен вариант апертуры антенны дифракционного излучения с КПД около 84%.

АВВ дифракционного типа представлена в статье [74]. Конструкция антенного устройства представляет собой плоский волновод из материала диэлектрика, открытую облучающую линию и металлическую резонансную решетку гребенчатого типа, параметры которой оптимизированы для работы в диапазоне частот от 9 ГГц до 10 ГГц. По результатам расчетов, представленная авторами модель антенного

устройства демонстрирует на частоте 9.5 ГГц УБЛ равный -11.7 дБ при ширине главного лепестка ДН, составляющей 3.1° .

1.5 Выводы по первой главе

В главе рассматривается современное состояние и перспективы развития в сфере технологий антенных решеток, обеспечивающих однокоординатное и двухкоординатное широкоугольное сканирование. Однако, некоторые важные аспекты в области исследования и разработки антенных решеток, обеспечивающих однокоординатное и двухкоординатное сканирование, остаются недостаточно исследованными, а именно:

- разработка антенных устройств на основе линзы Люнеберга обеспечивающей широкоугольное многолучевое сканирование без эффекта затенения;
- реализация антенных решеток с частотно-коммутационным сканированием с применением линзы Ротмана или Люнеберга для снижения потерь, формирования узкого луча диаграммы направленности при обеспечении низкого уровня боковых лепестков;
- разработка прямоугольных волноводно-щелевых антенн, имеющих внутренние замедляющие системы обеспечивающие низкие потери, с возможностью частотного сканирования;
- разработка волноводно-щелевых антенных решеток для широкоугольного частотного сканирования;
- разработка планарной антенны с частотно-механическим сканированием без использования сложных электронных компонентов.

2. Исследование и разработка перспективных путей построения фазированных антенных решеток на основе технологии плоской линзы Люнеберга

В настоящей главе проведен анализ и изложены результаты исследований проектирования МАР с частотным сканированием на основе линзы Люнеберга для систем спутниковой связи.

Исследования проводились с целью разработки многолучевых антенн, обеспечивающих работу в широком азимутальном секторе на основе плоской линзы Люнеберга обеспечивающей нейтрализацию эффекта затенения. Для достижения наилучших характеристик предлагается вариант двухслойной плоской линзы Люнеберга.

Особенности конструкции и построения линзы Люнеберга рассматривается множеством авторов в работах [76-84]. Одним из наиболее важных вопросов, возникающих при разработке линзы является стратификация ее слоев и связанный с этим подбор диэлектрических материалов, основанный на расчете диэлектрической проницаемости компонентов. Во многих работах, авторами отмечается возможность осуществления широкоугольного сканирования антенными системами на основе линзы Люнеберга. Автором диссертации в работах по данной теме исследуется возможность разработки антенного устройства с возможностью осуществления сканирования в угловом секторе до 180° .

В части публикаций рассматривается возможность реализации сканирования до 90° , связанная с геометрической формой линзы и расположением облучающих элементов, существенным недостатком которых является возникновение эффекта затенения. Варианты антенных устройств, предлагаемые другими исследователями, представляют конструкции, основанные на стандартном виде линзы Люнеберга в форме сферы.

Актуальной задачей является формирование и разработка антенных устройств, обеспечивающих двухкоординатное широкоугольное сканирование с сохранением высоких характеристик излучения при осуществлении частотного сканирования.

Во второй главе описывается возможность реализации антенной решетки с многолучевым широкоугольным сканированием на основе плоской двухслойной линзы Люнеберга, для систем спутниковой навигации:

1. Проведено исследование возможности широкоугольного сканирования, основанного на технологии двух симметричных плоских диэлектрических волноводов, формирующих плоскую линзу Люнеберга.
2. Исследованы способы стратификации слоев линзы для достижения наилучших характеристик ДН антенного устройства.
3. Разработаны и исследованы варианты МАР с широкоугольным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга.
4. Разработана методика проектирования антенной системы на основе плоской линзы Люнеберга, обеспечивающей широкоугольное сканирование.

2.1 Линза Люнеберга. Основные качества и характеристики

Линза Люнеберга обладает рядом уникальных свойств, обеспечивающих высокие характеристики антенных устройств. Линза Люнеберга способна обеспечить широкую полосу рабочих частот, а также сканирование в полном азимутальном секторе, за счет физических свойств собственной структуры, основанных на уменьшении коэффициента преломления вдоль ее радиуса. Основным математическим выражением для описания коэффициента преломления линзы, является формула:

$$\sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} = n(r) \quad (2.1)$$

где r – расстояние от центра до определяемой точки линзы;

R – внешний радиус тела линзы Люнеберга.

Основные недостатки линзы Люнеберга связаны с габаритными размерами и ее массой. Помимо этого, существует сложность производства линзы, так как требуется обеспечение изменения диэлектрической проницаемости по определенному закону.

Геометрия линзы обеспечивает преобразование сферического фронта волны в плоский, при расположении облучающего элемента непосредственно на поверхности линзы. Управление направлением главного луча ДН возможно осуществлять за счет перемещения излучающего элемента по поверхности линзы.

Конструкция линзы Люнеберга может быть выполнена в форме плоского цилиндра. Пара металлических пластин и цилиндрическая линза формируют плоский волновод, обеспечивающий прохождение волны H_{10} . Фазовая скорость волны зависит от расстояния между металлическими пластинами и значения диэлектрической проницаемости материалов, формирующих тело линзы.

Обычная линзовая антенна представляет собой конструкцию, в составе которой находятся один или несколько облучателей, соединенных с радиопрозрачной линзой. Физические свойства диэлектрической линзы, позволяют обеспечить распространение электромагнитной волны с фазовой скоростью, превышающей скорость света. Помимо ускоряющих линз, существуют линзы, снижающие фазовую скорость.

С помощью линзы Люнеберга возможно формировать остронаправленные ДН, для этого необходимо обеспечить соотношение, при котором размер и радиус кривизны поверхности линзы будет большим в сравнении с длиной волны.

Одной из причин, ограничивающих распространение диэлектрических линз, является их большая масса и сложность в производстве. Линзы Люнеберга не имеют повсеместного применения в системах связи, однако исследования по работе в миллиметровом диапазоне волн подтолкнули к активному развитию данной технологии.

Одним из разработанных способов уменьшения массы конструкции замедляющей линзы, стало внедрение в состав материала металлических частиц,

имеющих размеры меньшие, чем длина волны. Альтернативным вариантом создания диэлектриков, стала разработка легких пористых материалов, однако их производство требует сложные технологии.

Полоса рабочих частот линзы зависит от размеров линзы. В случаях, когда толщина линзы превышает длину волны, диапазон рабочих частот будет узкий. С целью увеличения ширины полосы, структура линзы формируется по ступенчатому закону. В соответствии с ним, лучи, преломленные в соседних зонах, достигая область раскрыва антенного устройства, обладают фазовым сдвигом равным 2π .

Стандартная линза Люнеберга представляет собой конструкцию, состоящую из ряда концентрических слоев на основе материалов диэлектриков либо радиочастотной пенокерамики. Плотность и коэффициент диэлектрической проницаемости слоев линзы уменьшаются с увеличением расстояния от ее центра, в соответствии с аппроксимацией закона изменения показателей преломления. В соответствии с этим законом, диэлектрическая проницаемость окружающей среды должна иметь меньший уровень, чем обладает внешний слой линзы.

Одним из вариантов линзы Люнеберга является структура, имеющая форму цилиндра, она позволяет обеспечить наиболее высокие характеристики излучения. В некоторых случаях цилиндрическая форма будет существенным недостатком, так как формирование и управление направлением главного луча ДН становится возможным только в одной плоскости.

2.2 Структура плоской двуслойной линзы Люнеберга

Рассмотрим конструкцию линзы Люнеберга, представляющую собой два соединенных одинаковых планарных волновода, образующих плоскость симметрии. Тогда, в симметричной структуре, в соответствии с теорией связанных волн, возможно распространение двух основных волн, обозначаемых как четная и нечетная [75]. Распространение четной и нечетной волны, соответствуют размещению в плоскости симметрии магнитной и электрической стенки соответственно. Четную и

нечетную волны возможно обозначить через коэффициенты γ_c и γ_n соответственно, как постоянные распространения. С их помощью возможно вычислить Линейный коэффициент связи (ЛКС) C :

$$\gamma_c - \gamma_n = 2C \quad (2.2)$$

Определить значение постоянных распространения при описании двухслойной линзы Люнеберга возможно используя значение эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) ε_{ec} и ε_{en} на основе уравнений, имеющих вид (2.3 – 2.5):

$$\gamma_c = k\sqrt{\varepsilon_{ec}} \quad (2.3)$$

$$\gamma_n = k\sqrt{\varepsilon_{en}} \quad (2.4)$$

где k – волновое число свободного пространства.

Процесс синтеза двухслойной плоской линзы Люнеберга представляет собой решение задачи, целью которой является определение двух функций $\varepsilon_{ec,n}(r)$, где распределение ЭДП будет соответствовать формуле [76]:

$$\varepsilon_{ec,n} = \left(2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \varepsilon_{c,n0} \quad (2.5)$$

где $\varepsilon_{c,n0}$ – определяемый свободный параметр в (2.6).

Для корректной работы линзовой антенны, внешняя среда должна обладать проницаемостью равной единице, тогда ЭДП четных волн будет соответственно равным значению ε_{c0} , а для нечетных ε_{n0} . Возникновения фазовых искажений распределения поля в выходной плоскости происходит в связи с отличием $\varepsilon_{c,n0}$ от единицы. На основе соотношений (2.2 – 2.5) получим, что значение ЛКС возможно описать функцией, имеющей вид:

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_{c0}} - \sqrt{\varepsilon_{n0}}}{2} k \left(2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) = C(r) \quad (2.6)$$

Тогда на основе (2.6) можно определить требования к фазовому распределению и потерям мощности на основе двух параметров вида $\varepsilon_{c,n0}$.

2.3 Практическая реализация линзы Лüneберга и проблемы конструирования антенных решеток на ее основе

Линза Лüneберга формирует ДН на основе закона изменения коэффициента преломления в радиальном направлении. Реализация практической модели в соответствии с этим законом, с плавным изменением диэлектрической проницаемости, является сложной задачей, поэтому структура линзы формируется многослойной, обеспечивая ступенчатое изменение коэффициента преломления.

Существует несколько вариантов стратификации линзы Лüneберга путем разбиения структуры на отдельные слои. Наименее трудозатратным и простым способом является разбиение тела линзы на слои по направлению, соответствующему радиальной координате, с равным периодом и соответствующим изменением диэлектрической проницаемости каждого слоя. Данный вариант стратификации является наиболее распространенным, и в исследованиях используется, как образцовый способ. Альтернативный вариант простого разбиения линзы — это использование в качестве длины шага, значение равное разделению радиуса линзы. В настоящее время активно развивается и применяется на практике способ стратификации линзы на основе математического расчета параметров слоев по отдельности. Этому способствует активное развитие вычислительной техники и специальное программное обеспечение. Вместе с этим, современные вычислительные мощности позволяют производить оптимизационный расчет линзы Лüneберга путем подбора оптимальных параметров слоев.

Для разработки структуры линзы Лüneберга возможно применение теории эффективной среды (Effective Medium Theory – EMT), этот способ позволяет произвести расчет диэлектрической проницаемости слоев используя имеющиеся характеристики материалов. Среди методов EMT выделяется метод Бруггмана, описываемый с помощью равенства [77]:

$$\frac{\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{к}}(1-p)}{\varepsilon_{\text{в}} - \varepsilon_{\text{б}}} = \left(\frac{\varepsilon_{\text{к}}}{\varepsilon_{\text{б}}}\right)^{1/3}, \quad (2.7)$$

где ε_b – показатель диэлектрической проницаемости вводимого материала;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость основного материала;

ε_k – диэлектрические проницаемости результирующего материала;

p – коэффициент заполнения.

На основе формулы (2.7) получим выражения для расчета линзы радиуса R , конструкция которой включает N слоев, имеющих равную толщину, где диэлектрическая проницаемость i -го слоя определяется в соответствии с уравнениями:

$$\varepsilon_r \left(\frac{r_i - r_{i+1}}{2} \right) = \varepsilon_i \quad (2.8)$$

$$r_i = r_{i+1} - R/N \quad (2.9)$$

Применение данного метода наиболее эффективно, когда линза обладает равномерным распределением слоев и размерами ячеек, соответствующими диапазону $\lambda/10 \sim \lambda/4$. Заполнение линзы и проницаемость соответствующих слоев возможно рассчитать по формулам (2.7-2.9) если принять, что базовый слой обладает диэлектрической проницаемостью равной 1 (значение диэлектрической проницаемости воздушной среды).

Диэлектрический материал включает в себя цилиндрические отверстия в целях обеспечения требуемого уровня диэлектрической проницаемости, тогда значение коэффициента диэлектрической проницаемости слоя будет определяться в соответствии с равенством [78]:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \varepsilon(1 - a) + a \quad (2.10)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала;

a – коэффициент заполнения слоя линзы, при этом:

$$a = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{c} \right)^2 \quad (2.11)$$

где d – диаметр отверстий в диэлектрике;

c – расстояние между центральными точками отверстий.

Расчет толщины линзы Лüneберга основывается на вычислении необходимого расстояния между пластинами и определении коэффициента преломления материалов диэлектриков. Расчет габаритных размеров линзы осуществляется в соответствии с формулой:

$$s = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_d^2 - 2 + (r')^2}} \quad (2.12)$$

где s – расстояние между пластинами;

n – требуемое значение коэффициента преломления диэлектрика;

r' – нормированная к радиусу линзы радиальная координата.

Тогда, на основе вышеизложенных равенств уравнение для расчета толщины линзы Лüneберга принимает вид:

$$\operatorname{tg} \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} (s - t) \sqrt{1 - n^2} \right] + \frac{\sqrt{n_d^2 - n^2}}{n_d^2 \sqrt{1 - n^2}} \operatorname{tg} \left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_d^2 - n^2} \right] = 0 \quad (2.13)$$

Полученное значение расстояния между пластинами линзы должно соответствовать и удовлетворять соотношению, при котором это расстояние будет меньше, чем половина длины волны, распространяющейся в диэлектрике.

2.4 Исследование и разработка многолучевой антенны для систем спутникового позиционирования на основе двуслойной цилиндрической линзы Лüneберга

В составе конструкции апертурного антенного устройства облучатель является элементом, определяющим формирование амплитудного распределения. В зависимости от его параметров находятся характеристики излучения.

К разрабатываемым облучателям, основными требованиями являются:

- обеспечение поляризации излучения, установленной требованиями к антенному устройству;
- формирование сферического фазового фронта волны;
- обеспечение высокого значения КПД для повышения эффективности устройства и сохранения высоких характеристик во всей полосе рабочих частот.

Существующие облучатели разделяют на несколько типов, таких как волноводные, микрополосковые и щелевые [80]. Волноводные облучатели демонстрируют высокие характеристики ДН, имеют низкий уровень кроссполяризации и круговую поляризацию, однако существенным недостатком такого типа облучателей являются большие габаритные размеры, значительно ограничивающие их практическое применение. Облучающие элементы обычно располагаются на поверхности линзы Лüneберга. Их положение относительно центра линзы соответствует фокусному расстоянию устройства.

Конструкция антенного устройства на основе линзы обычно представляет собой систему из одного либо нескольких облучателей и линзы с совпадающим фокусным расстоянием. Такая конструкция обеспечивает формирование ДН с требуемым амплитудным распределением и получение оптимальных характеристик излучения [81].

Круглая форма линзы Лüneберга позволяет обеспечить широкий азимутальный сектор сканирования антенной системы, однако на эффективность реализации этого свойства влияет метод сканирования. Одним из наиболее рациональных вариантов для широкоугольного сканирования является коммутационный метод. Данный метод, в сравнении с механическим или электронным, не обладает такими недостатками, как узкая полоса рабочих частот, или большие потери, при этом метод позволяет повысить точность, так как заранее известны параметры сектора сканирования ДН. В работе [82] авторами рассматривается модель антенной системы на основе линзы Лüneберга с коммутационным сканированием, особенностью которой является структура в форме концентрических колец внутри плоского металлического волновода. Конструкция антенного устройства позволяет осуществлять сканирование в секторе до 90° . Плоская цилиндрическая линза Лüneберга в составе антенного устройства, формирующего ТЕМ-рупор, позволяет использовать коммутационное сканирование для демонстрации основных достоинств данного метода [83]. Рассмотрим модель антенного устройства, обладающего схожей конструкцией,

однако имеющей упрощение в виде отсутствия концентрических колец. На Рисунке 2.1 представлена модель разработанной антенны.

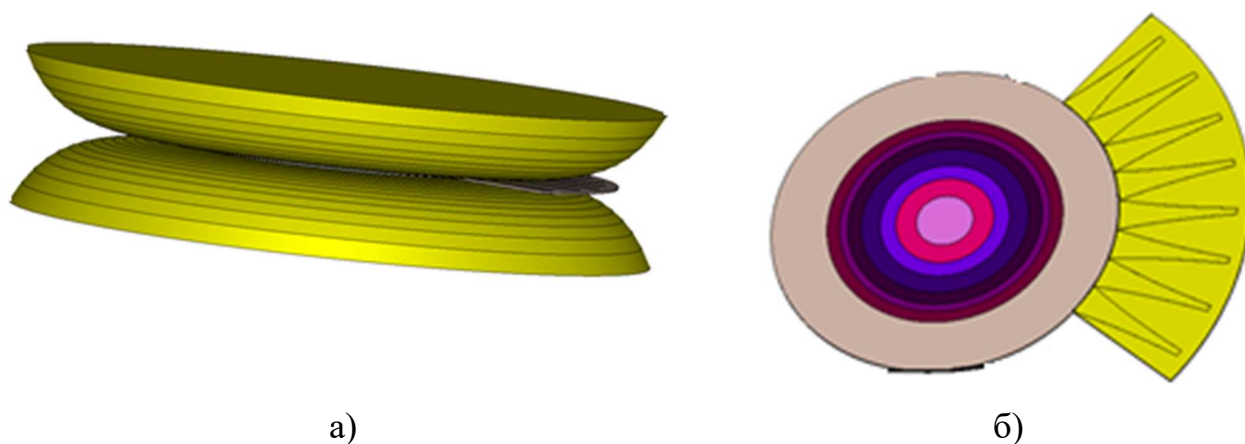
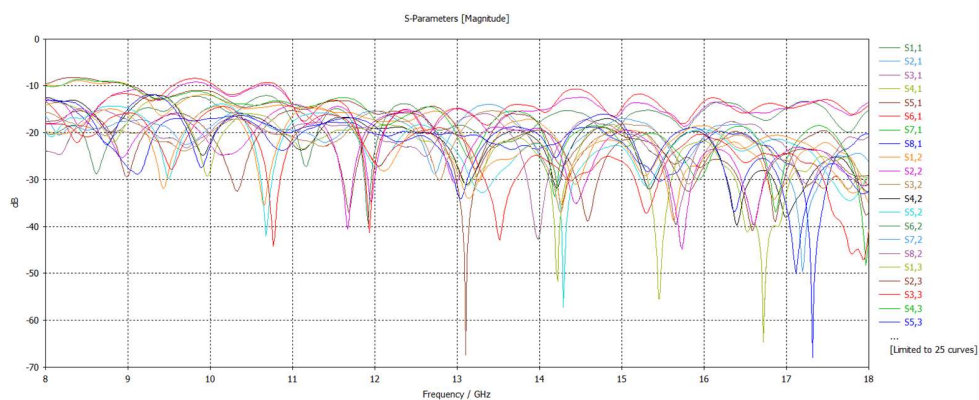


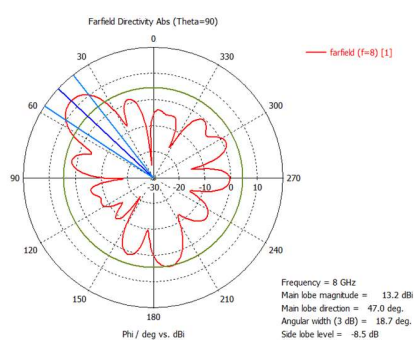
Рисунок 2.1 – Антенное устройство на основе плоской линзы Люнеберга с коммутационным сканированием: а) общий вид модели; б) линза Люнеберга и соединенная с ней печатная плата с несимметричными полосковыми линиями

Полосковые дорожки обеспечивают коммутационное питание и на основе физических свойств линзы Люнеберга позволяют осуществлять сканирование в азимутальном секторе до 90° . Современные технологии моделирования, доступные в программе CST Studio Suite, позволяют провести оптимизацию структуры для достижения наилучших требуемых характеристик устройства [84].

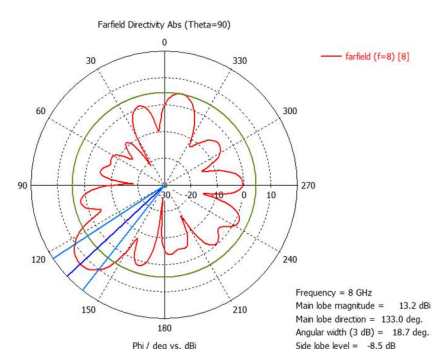
На Рисунке 2.2 представлен графики зависимости S-параметра, полученный в результате моделирования антенного устройства.



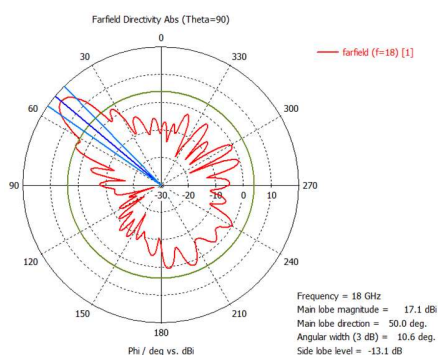
a)



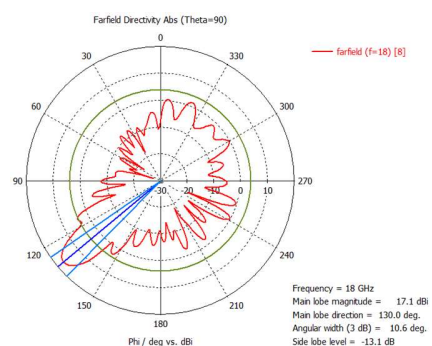
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.2 – Сравнение характеристик антенного устройства на основе линзы Люнеберга: а) взаимное влияние полосковых дорожек; б) ДН при работе первой коммутационной дорожки на частоте 8 ГГц; в) ДН при работе восьмой коммутационной дорожки на частоте 8 ГГц; г) ДН при работе первой коммутационной дорожки на частоте 18 ГГц; д) ДН при работе восьмой коммутационной дорожки на частоте 18 ГГц

По представленным на Рисунке 2.2 ДН видно, что полосковые дорожки оказывают минимальное влияние друг на друга при коммутационном сканировании. Сектор сканирования антенного устройства составляет до 90° , главный лепесток ДН имеет ширину от 10° до 20° .

Основным недостатком линзовых антенн, является взаимное влияние облучающих элементов, расположенных вдоль образующей линзы. При осуществлении сканирования в секторе свыше 90° возникает эффект затенения, из-за влияния излучателей, искажающих проходящие сквозь линзу лучи. Узкий азимутальный сектор сканирования позволяет расположить излучающие элементы таким образом, чтобы при работе они не оказывали негативного эффекта друг на друга.

Для осуществления сканирования в широком азимутальном секторе без «слепых» пятен, возможно применить структуру, представляющую собой двухслойную плоскую линзу Люнеберга. Практическое применение теории связанных волн, позволяет спроектировать двухслойный планарный волновод, форма которого позволит разместить облучающие элементы таким образом, чтобы обеспечить сканирование в полном азимутальном секторе.

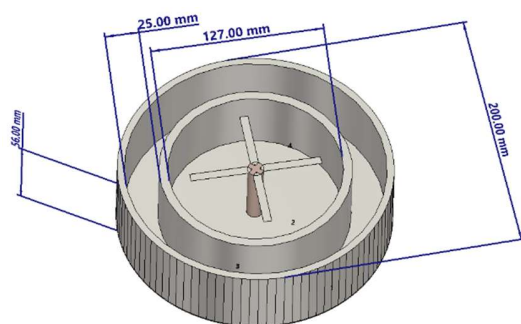
Структура двухслойной линзы, основанная на связи двух планарных волноводов, позволяет осуществлять полное круговое сканирование [24]. Стратификация слоев плоской двухслойной линзы производится также, как и обычной сферической линзы Люнеберга. Важной задачей при проектировании такой линзы становится задача достижения максимального уровня перекачки мощности электромагнитной волны из облучаемого слоя в излучающий слой.

Конструкция плоской линзы, помимо двух симметричных волноводов, включает в составе собственной структуры, металлический перфорированный экран, обеспечивающий наилучшее согласование волноводов. Параметры перфорации экрана следует подобрать таким образом, чтобы обеспечить наиболее полную передачу излучения квазиточечных источников из одной части линзы в другую.

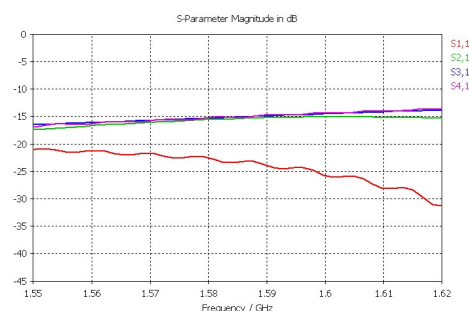
2.5 Антенные устройства для комплексов спутниковой связи, обеспечивающая работу в широком азимутальном секторе

Антенные системы, обеспечивающие спутниковую связь, широко представлены в настоящее время различными типами устройств в L-диапазоне от 1.24 ГГц до 1.6 ГГц [85-88]. Одним из требований к их характеристикам является низкий уровень боковых лепестков, а также возможность осуществлять сканирование в широком азимутальном секторе. Кроме того, антенное устройство должно обладать небольшими габаритными размерами и простой для изготовления конструкцией. Этим требованиям отчасти удовлетворяют различные виды антенн, такие как Choke Ring [89-91].

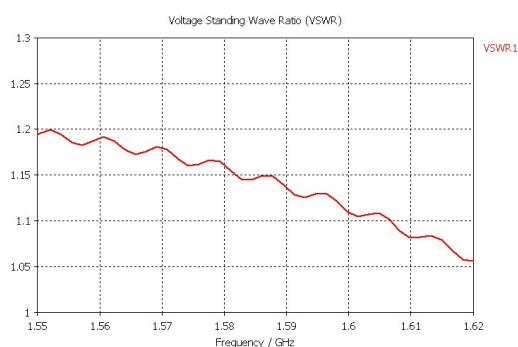
Антенны Choke Ring позволяют обеспечить максимальное усиление в направлении, перпендикулярном плоскости антенны, при минимальном УБЛ. Конструкция устройства представляет собой диполь, окруженный концентрическими кольцами, выполненный с применением материалов диэлектриков. На Рисунке 2.3 представлен вариант устройства для работы в полосе частот от 1.55 ГГц до 1.62 ГГц и его основные параметры.



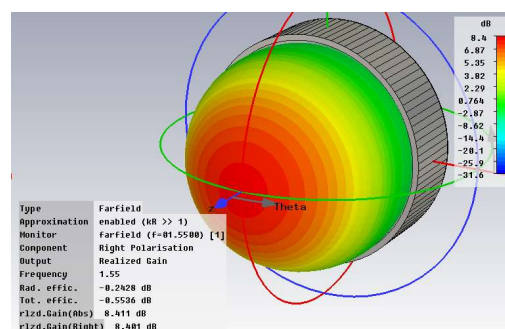
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.3 – Антенна Choke Ring для GPS-GLONASS и ее основные характеристики: а) внешний вид модели с фронтальной стороны со снятым обтекателем; б) S-параметры антенного устройства; в) частотная зависимость КСВН на входе антенны; г) ДН на частоте 1.55 ГГц

Антенное устройство обеспечивает круговую поляризацию радиоволны и имеет высокие характеристики при низкой сложности конструкции, однако имеет ширину главного луча ДН, около 50° . Подобные антенны, за счет миниатюрных габаритов, возможно использовать на небольших летательных аппаратах. Преимуществом данного диапазона является низкое влияние атмосферных явлений на передачу сигнала, однако существенным недостатком является низкая пропускная способность. Помимо этого, данный диапазон является наиболее загруженным в настоящее время.

При разработке систем спутниковой связи одним из основных требований к наземным антеннам является обеспечение устойчивого канала связи. В России спутниковая связь задействует С- диапазон частот. Для линии Спутник – Земля он

использует частоты от 3.5 ГГц до 4.2 ГГц, а для линии Земля – Спутник от 5.9 ГГц до 6.5 ГГц. Данный диапазон обеспечивает наиболее стабильную работу даже при неблагоприятных условиях окружающей среды, так как потери имеют минимальный уровень, однако антенные устройства, действующие в данном диапазоне, отличаются большими габаритными размерами.

Вариантом антенного устройства, отличающегося простой конструкцией, для работы в данном диапазоне возможно представить кросс-диполь [92], [93]. Такая антенна позволяет обеспечить постоянный уровень сигнала, и может формировать всенаправленное излучение ДН. На Рисунке 2.4 представлен вариант антенны кросс-диполь с 4 Г-образными рассеивателями.

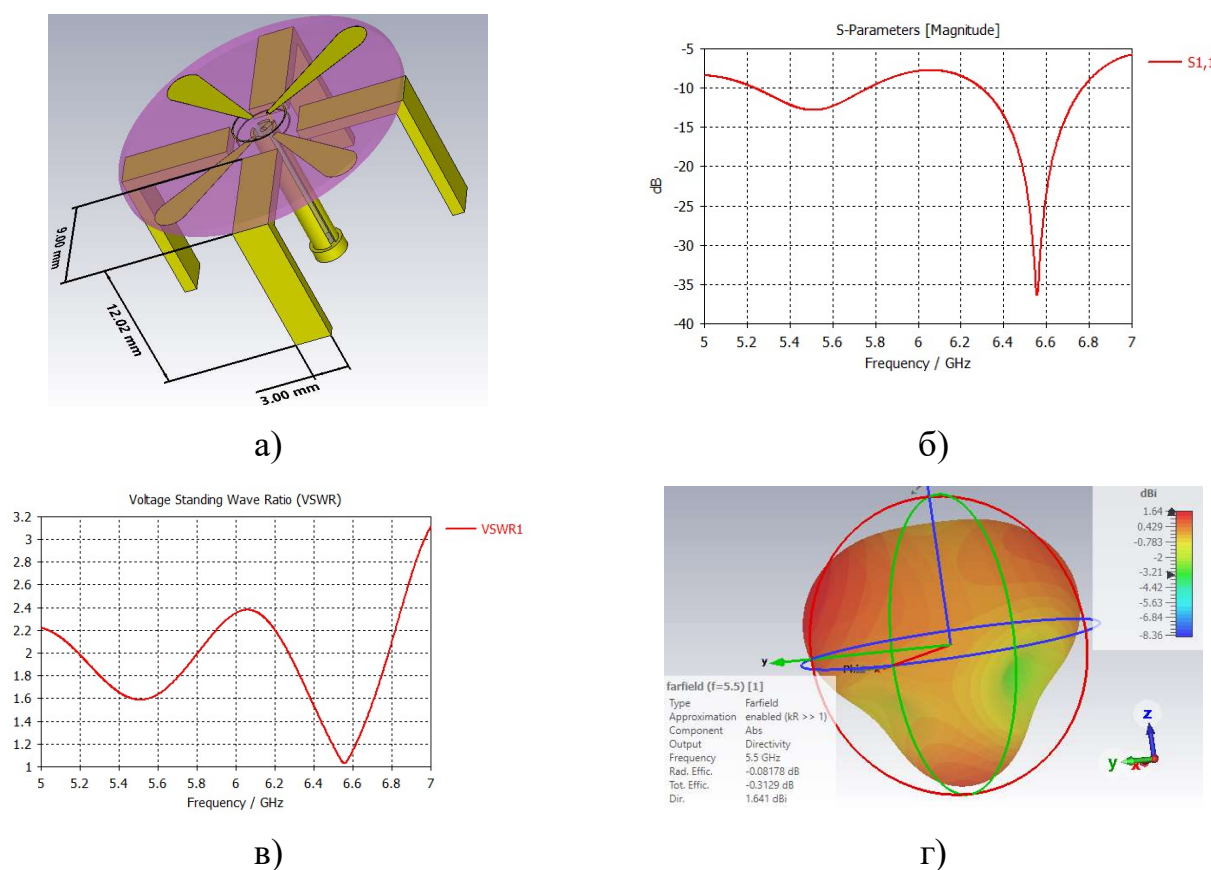


Рисунок 2.4 – Антенна кросс-диполь с Г-образными рассеивателями и ее основные характеристики: а) внешний вид модели антенны; б) S-параметры антенного устройства; в) частотная зависимость КСВН на входе антенны; г) ДН на частоте 5.5 ГГц

Кросс-диполь в диапазоне от 5 ГГц до 7 ГГц демонстрирует хорошие характеристики в рабочем режиме. Г-образные рассеиватели в составе конструкции позволяют обеспечить работу антенны в полносферическом пространстве. Параметры разработанного антенного устройства позволяют установить его на небольшом аппарате носителя.

В настоящее время имеют актуальность разработка и исследование антенн, передающих информацию о текущем состоянии их носителя. Наиболее простым устройством, для выполнения данной цели, возможно представить спиральные антенны конической формы [94], [95]. На Рисунке 2.5 представлена модель спиральной антенны и ее основные характеристики в диапазоне частот от 6 ГГц до 7 ГГц.

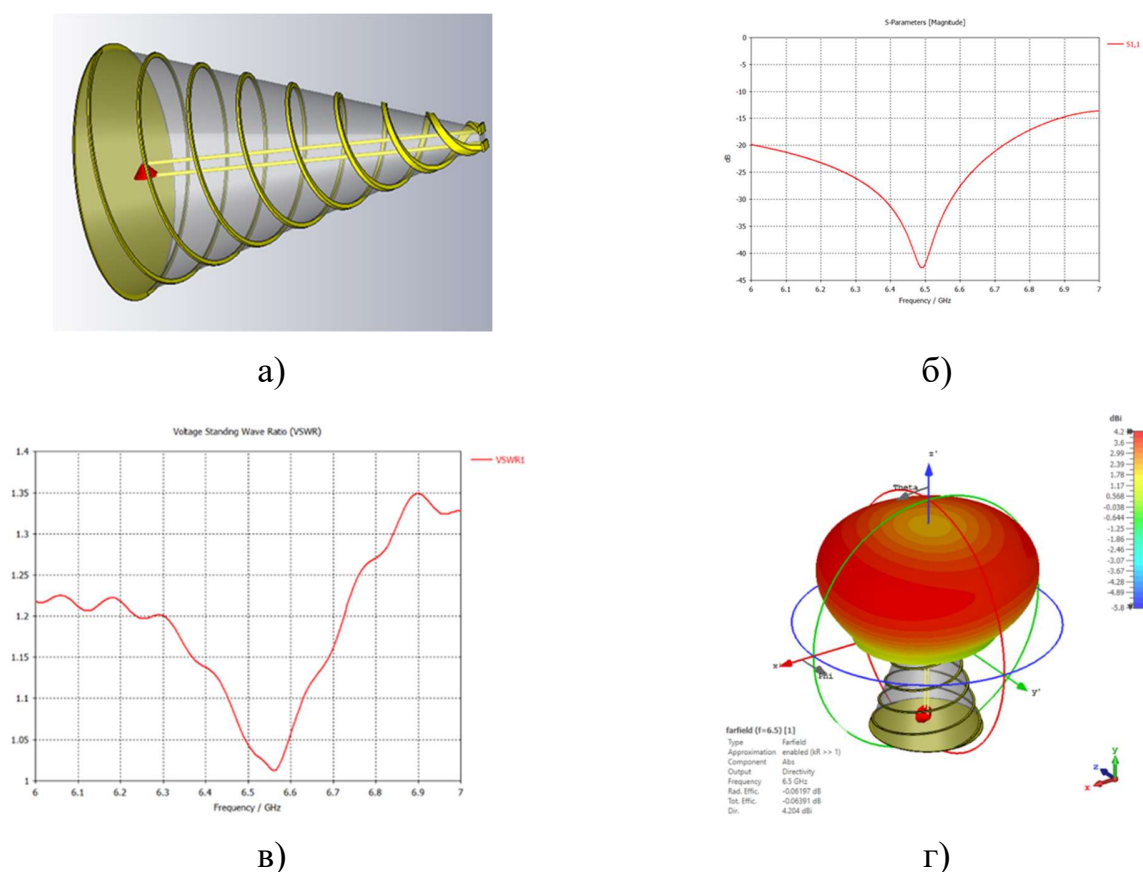


Рисунок 2.5 – Спиральная антенна и ее основные характеристики: а) внешний вид модели антенны; б) S-параметры; в) частотная зависимость КСВН на входе антенны; г) ДН на частоте 6.5 ГГц

Диаметр основания антенны составляет 24 мм, высота устройства 36.1 мм. Пара спиралей может быть выполнена из медной проволоки, имеющей диаметр $0.5 \div 0.6$ мм, или из полосок катаной медной фольги шириной $0.5 \div 1$ мм. По результатам исследования предложенная конструкция способна обеспечить высокие характеристики излучения в полосе частот от 6 до 7 ГГц, однако антенное устройство демонстрирует ширину главного луча ДН более 50° .

Частным случаем спутниковой связи для передачи данных о состоянии техники и водителя является система ЭРА-ГЛОНАСС. Она предназначена для обеспечения устойчивого рабочего канала спутниковой связи у автотранспорта в случае аварийной ситуации. Поэтому для работы данной системы необходимы устройства, имеющие компактные размеры, позволяющие устанавливать антенны на легковой автомобиль, и характеристики, обеспечивающие устойчивый уровень сигнала при неблагоприятных условиях окружающей среды.

Рассмотрим модель многолучевой антенной системы для комплексов спутниковой связи ЭРА-ГЛОНАСС в диапазоне частот от 5.8 ГГц до 6.2 ГГц в секторе сканирования 180° . Модель антенны представлена на Рисунке 2.6.

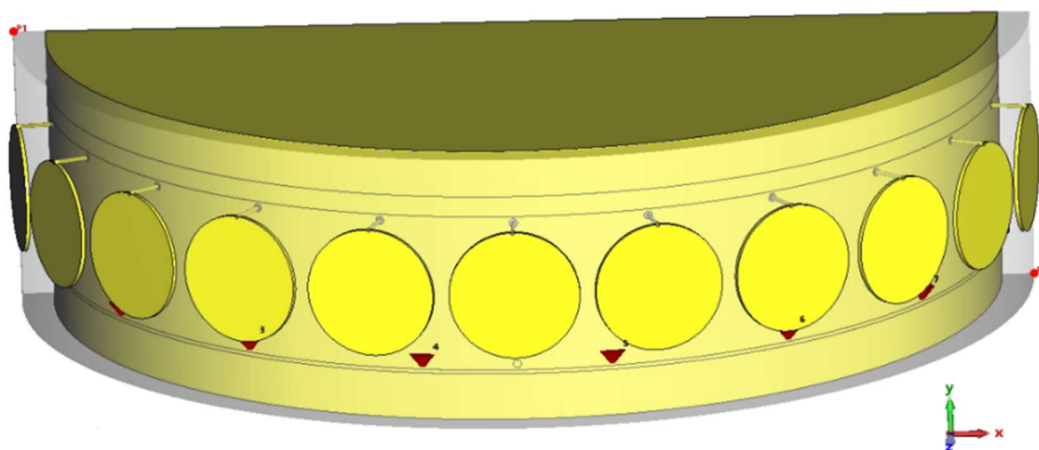


Рисунок 2.6 – Внешний вид модели MAP для ЭРА-ГЛОНАСС

Диаграммообразующим устройством антенной системы выступает половина полноазимутальной линзы Лüneберга. Конструкция антенного устройства имеет вид

половины цилиндра. Такая форма обеспечивает работу устройства в широком азимутальном секторе без возникновения эффекта затенения. Линза Люнеберга установлена в металлическом корпусе, за счет чего формируется двухслойный планарный диэлектрический волновод, короткозамкнутый на месте среза. Плоскость линзы состоит из нескольких полуколец, состоящих из неоднородных 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 Люнеберга, разделенные металлическим экраном, имеющим периодические отверстия шестиугольной формы с длинной стороны равной 6.95 мм.

На внешней части антенного устройства располагается ряд коммутационных портов, требуемых для соединения антенны через коаксиальные кабели с передающим устройством. По внешнему радиусу корпуса проложена подложка из полистирола необходимая для установки патч-излучателей. Помимо этого, подложка обеспечивает дополнительную защиту устройства от воздействия окружающей среды. На Рисунке 2.7 представлен вид антенного устройства в разрезе.

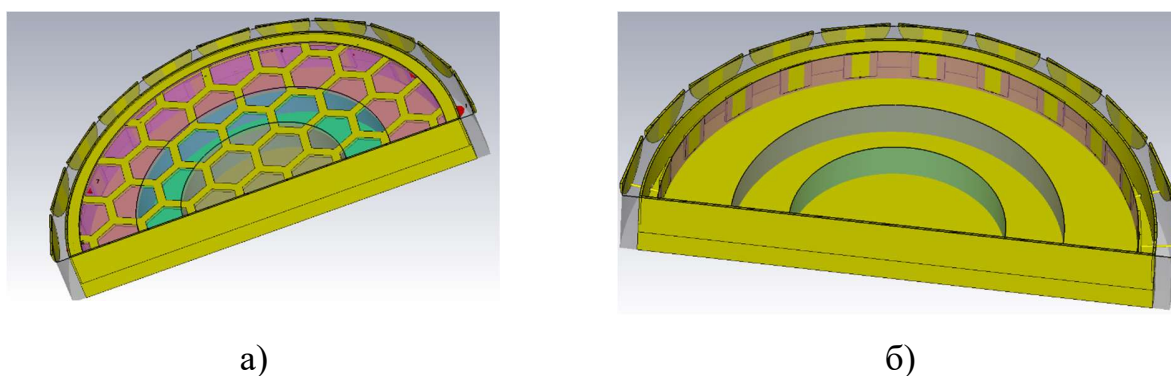


Рисунок 2.7 – Модель МАР в разрезе в горизонтальной плоскости: а) нижняя половина, включающая в себя перфорированный экран; б) верхняя половина

В целях определения характеристик электромагнитных волн с помощью САПР воспользуемся путем моделирования методом Вейланда. Данный метод основывается

на уравнениях Максвелла в интегральной форме, он реализован в Т-вычислителе в программе CST Studio Suite [84]. Применение этого метода для электродинамического моделирования антенных устройства позволяет получить высокую точность расчетов, однако требует больших затрат времени, связанных с большими объемами вычислительных сеток.

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 2.8. Результаты моделирования для четырех портов расположенных с противоположной стороны будут схожими, в связи с симметричной формой устройства.

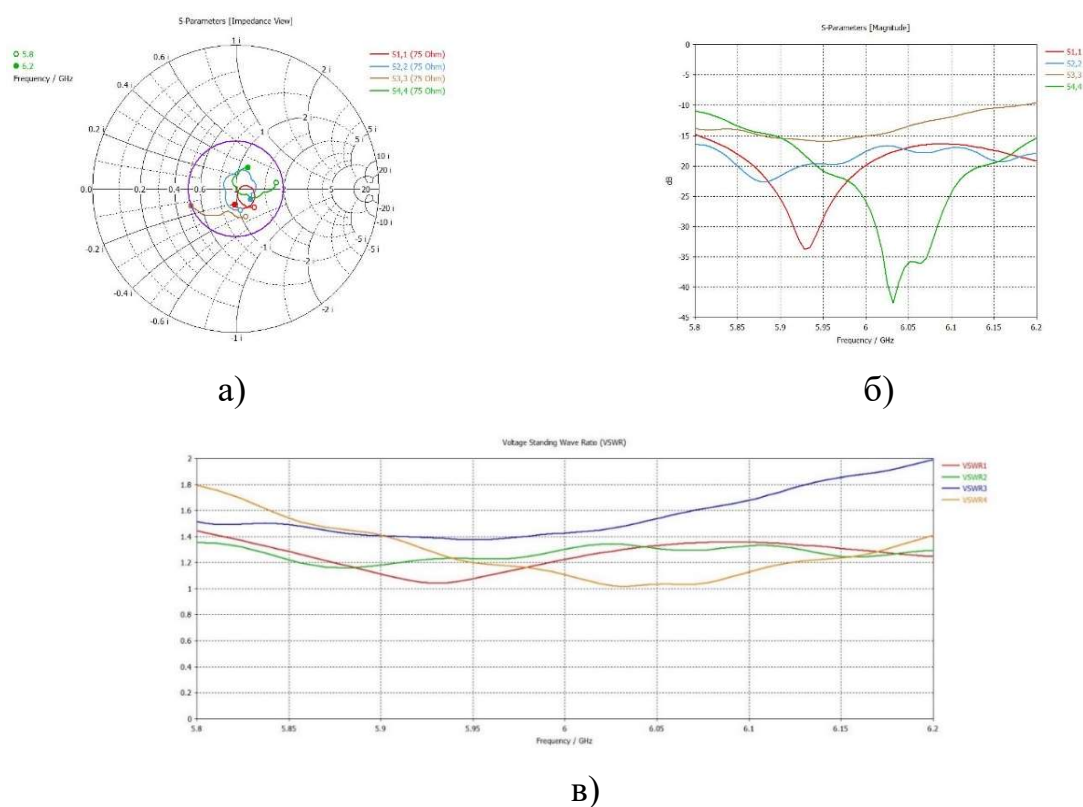


Рисунок 2.8 – Результаты расчета: а) номограмма Вольперта-Смита в активном режиме; б) S_{11} -параметра для 1 – 4 варианта коммутации МАР для ЭРА-ГЛОНАСС; в) значение коэффициента стоячей волны на входах четырех полосковых линий

Сигнал с работающих входных портов поступает на внутренние патч-элементы, примыкающие к нижней половине линзы Лüneберга. Электромагнитные волны распространяются в нижней части линзы, затем переходят через перфорированный экран в верхнюю часть линзы. Рассматриваемый вариант конструкции плоской линзы обеспечивает наиболее низкие потери электромагнитной волн. Потери в материалах антенной решетки представлены на Рисунке 2.9.

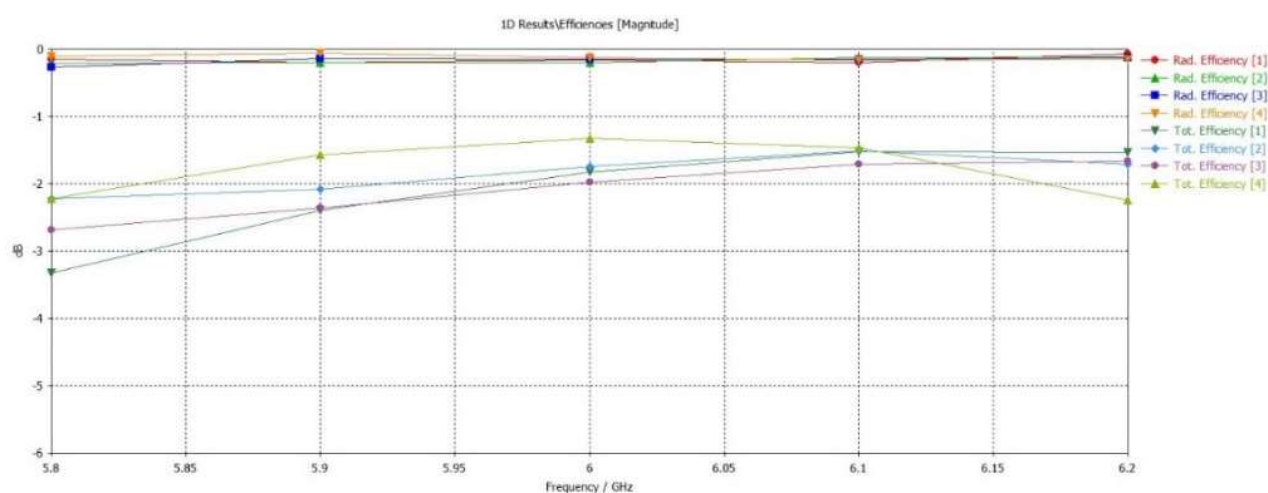


Рисунок 2.9 – Результаты моделирования потерь в материалах антенной решетки (верхние кривые) и суммарный КПД (нижние кривые), дБ

Распространяясь в верхней половине линзы, электромагнитная волна достигает патч-элементов, соединенных со внешними излучающими элементами, формирующими ДН антенны. На Рисунках 2.10 – 2.12 представлены полученные в результате моделирования ДН при работе 1 – 4 излучающего элемента, в полосе рабочих частот.

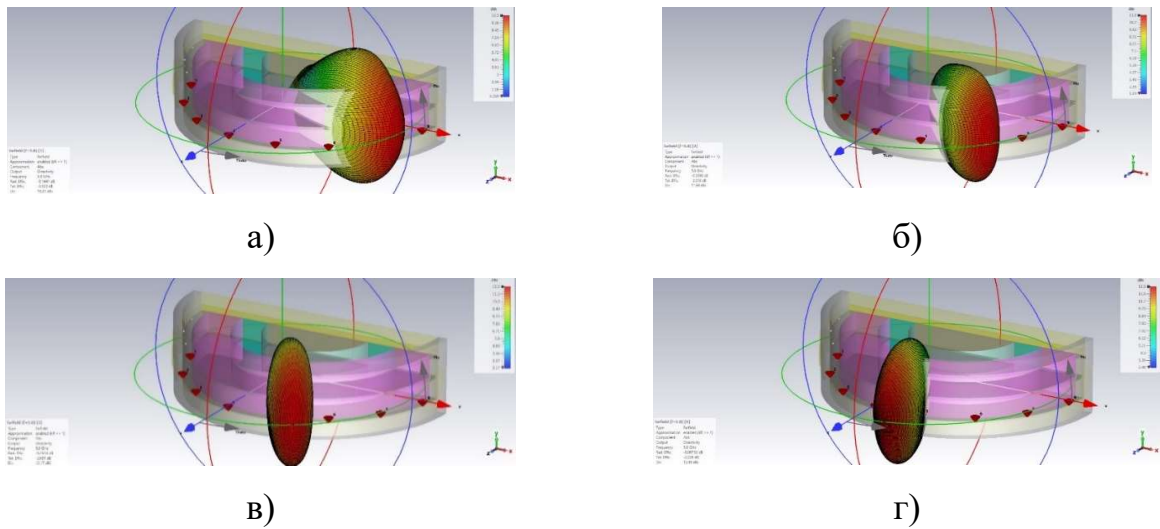


Рисунок 2.10 – Результаты моделирования ДН, на частоте 5.8 ГГц: а) ДН при работе первого излучающего элемента; б) ДН при работе второго излучающего элемента; в) ДН при работе третьего излучающего элемента; г) ДН при работе четвертого излучающего элемента

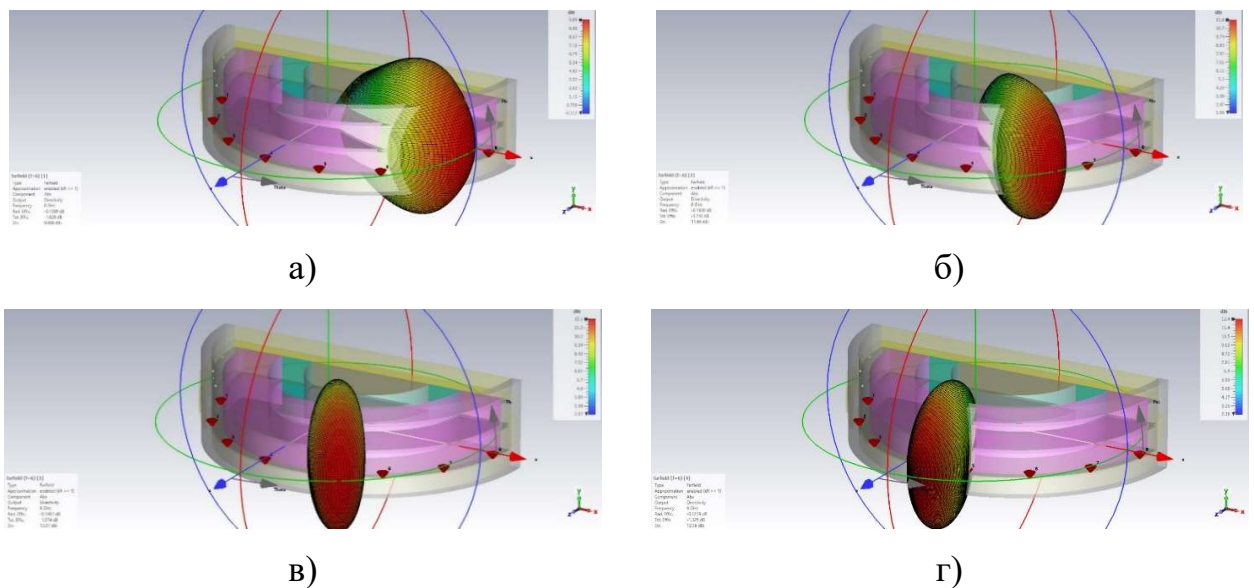


Рисунок 2.11 – Результаты моделирования ДН, на частоте 6 ГГц: а) ДН при работе первого излучающего элемента; б) ДН при работе второго излучающего элемента; в) ДН при работе третьего излучающего элемента; г) ДН при работе четвертого излучающего элемента

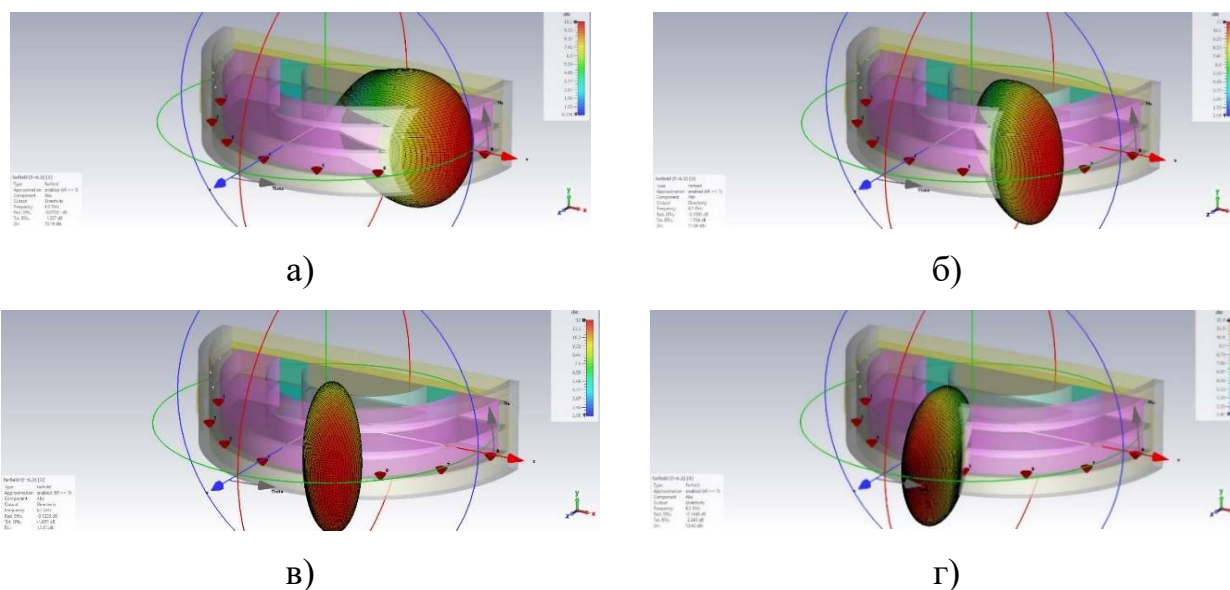


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования ДН на частоте 6.2 ГГц: а) ДН при работе первого излучающего элемента; б) ДН при работе второго излучающего элемента; в) ДН при работе третьего излучающего элемента; г) ДН при работе четвертого излучающего элемента

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 Лüneберга.

2.6 Методика реализации построения фазированных антенных решеток на основе реализации технологии плоской линзы Люнеберга

Основные этапы методики проектирования антенной системы, обеспечивающей широкоугольное сканирование на основе плоской линзы Люнеберга состоят из следующих шагов:

1. Определение и выбор основных элементов конструкции антенной системы для реализации широкоугольного сканирования, в соответствии с требованиями технического задания, оценка характеристик и возможностей проектирования устройства, обеспечивающего широкоугольное сканирование. Определение материалов и их характеристик, требуемых для построения линзы Люнеберга. Выбор конструкции излучающих элементов.

1.1 Определение габаритов линзы Люнеберга, параметров перфорации металлического экрана, разделяющего тело линзы и оптимального числа облучающих и излучающих элементов антенной решетки, обеспечивающих минимизацию влияния эффекта затенения.

2. Проектирование электродинамической модели антенны в CST Studio Suite 2025 для проведения анализа характеристик на основе метода конечного интегрирования Вейланда, в пространственно-временной области. Определение возможности упрощения физической модели антенны для снижения затрат времени и требуемых для расчетов мощностей, выбор наиболее простого варианта стратификации линзы в целях снижения трудоемкости расчетов.

2.1 Выбор оптимальных параметров сетки для проведения численного анализа, проверка сходимости результатов анализа характеристик при изменении числа ячеек на длину волны, определение минимального числа разбиения на ячейки сетки элементарных элементов.

3. Проведение анализа предельных возможностей многолучевого широкоугольного сканирования антенного устройства и определение граничных

параметров работы устройства, расчет основных характеристик работы устройства. Анализ полной электродинамической модели в САПР с последующей оптимизацией параметров разрабатываемого устройства в целях достижения наилучших характеристик антенного устройства.

3.1 Выбор ключевых критериев оптимизации: значение КНД в направлении максимального излучения, ширина главного лепестка ДН в рабочей полосе частот, минимизация уровня боковых лепестков, минимизация потерь на входе элементов антенного устройства либо суммарных потерь и т.д.

3.2 Первоначальное приближение параметров антенной решетки основывается на упрощенной модели устройства, в расчетах не учитываются размеры экрана и антенного обтекателя, параметры устройства носителя, используется упрощенная модель S-параметров нагрузок и портов.

4. Выбор устройства питания для работы многолучевой частотно-сканирующей схемы антенны. Определение влияния погрешностей в размерах антенного устройства на его характеристики. Подготовка упрощенной модели антенны для изготовления макета.

5. Изготовление макета разрабатываемого антенного устройства для осуществления экспериментальных исследований и проведения измерений основных параметров устройства.

6. Корректировка макета антенны на основе проведенных исследований, сопоставление результатов измерений с электродинамической моделью в САПР. Верификация физико-математической модели по результатам натурных экспериментальных испытаний.

2.7 Выводы по главе второй

В главе рассматриваются основные особенности линзы Люнеберга, которые необходимо учитывать при проектировании антенного устройства, базой которого выступает линза, в целях обеспечения многолучевого широкоугольного

сканирования. Физические свойства линзы Люнеберга оказывают минимальное воздействие на параметры излучения, что позволяет сохранить высокий уровень необходимых характеристик излучаемых радиоволн при осуществлении сканирования. Отдельной задачей при проектировании линзы Люнеберга является ее стратификация и связанные с этим процессом подзадачи, направленные на расчет параметров слоев.

Помимо этого, продемонстрирована возможность формирования плоской цилиндрической линзы Люнеберга, представляющей собой два планарных диэлектрических волновода соединенных друг с другом металлическим перфорированным экраном, данная структура демонстрирует практическое применение теории связанных волн. Структура и форма линзы позволяет осуществлять сканирование в широком азимутальном секторе вплоть до 360° без возникновения эффекта затенения.

Основным результатом данной главы является конструкция многолучевой антенной решетки для систем спутниковой связи в полосе частот от 5.8 ГГц до 6.2 ГГц. В качестве диаграммообразующей системы антенного устройства выступает плоская линза Люнеберга состоящая из двух слоев неоднородных диэлектрических материалов, соединенных между собой через металлический экран с перфорацией. Данная структура обеспечивает наиболее полную передачу электромагнитной волны из одной части линзы в другую. Питание устройства осуществляется за счет ряда патч-элементов, облучающих нижний слой линзы Люнеберга. Верхняя часть линзы вместе с рядом соединенных с ней патч-элементов формирует частотно-управляемую ДН, сохраняющую высокие характеристики в азимутальном секторе до 180° , без возникновения слепых пятен.

3. Исследование и разработка линейных антенных решеток на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования

Одним из наиболее распространенных типов волноводов являются прямоугольные волноводы. Их главной особенностью считается распространение волн по направлению вдоль боковой стенки волновода. Простая конструкция прямоугольных волноводов позволяет разрабатывать на их основе ВЦАР, способные реализовывать высокие характеристики эффективности излучения [96 - 98], а также замедляющие линии передачи.

Замедляющие линии передачи в СВЧ технике – это линии передачи, конструктивные особенности которых способны обеспечить уменьшение фазовой скорости электромагнитных волн, направленных вдоль оси системы, в сравнении со скоростью в свободном пространстве. Они широко применяются в составе конструкций вакуумных волноводных устройств с целью отбора мощности проходящими волнами за счет уменьшения кинетической энергии потока [99]. В сочетании с волноводно-щелевыми элементами, замедляющие системы способны продемонстрировать более высокую эффективность излучения и низкий уровень боковых лепестков. Конструктивные особенности ВЦАР позволяют формировать планарные устройства, обладающие обтекаемыми формами, либо позволяют устанавливать радиопрозрачные корпуса. Благодаря этому, линейные антенные решетки хорошо подходят для использования в составе бортовых воздушных и космических радиолокационных комплексов.

При проектировании волноводов, в состав конструкции, с целью снижения критической длины волны основного типа, включается вставка из материала диэлектрика [100]. Вместе с этим, формирование диэлектрического слоя вдоль широкой стенки волновода с расположенными на ней щелями излучения, оказывает положительное влияние на увеличение рабочей полосы частот. Помимо этого, диэлектрическая вставка может служить в качестве дополнительного элемента

защиты конструкции антенны от внешних неблагоприятных условий, сохраняя высокий уровень согласующих характеристик антенного устройства. Другим достоинством ВЩАР можно отметить возможность реализации оптимальных форм ДН и сравнительно простое устройство возбуждения [100].

Недостатками ВЩАР обычно выделяют ограничение частотного диапазона, так как вместе со смещением частоты происходит отклонение главного луча и изменение ширины ДН. Помимо этого, существует зависимость ширины сектора сканирования от расстояния между излучающими элементами. Однако, существенным недостатком становятся габаритные размеры антенных решеток, что уменьшает вариативность их применения. Добавление в состав конструкции диэлектрических компонентов позволяет уменьшить габаритные размеры, однако увеличивает значение коэффициента отражения излучателя.

В целях снижения фазовой скорости, диэлектрический материал может заполнять полностью волноводный канал либо его отдельную часть. В работе [101] рассматривается влияние поликоровой пластины на характеристики антенной решетки, выполненной на основе волноводно-щелевой антенны. Управление положением пластины и ее смещение позволяют изменять направление главного лепестка ДН. Помимо этого, диэлектрический материал выступает в качестве подложки для патч-элементов антенной решетки, а также выступает как дополнительная внешняя защита конструкции волновода от воздействия окружающей среды.

Альтернативным вариантом по уменьшению габаритных размеров антенных решеток является применение волноводов, имеющих сложную форму сечения. Характеристики излучения АР зависят от характера взаимных связей элементов, так, в случае роста поперечных размеров элементов, произойдет увеличение высших типов волн в раскрывах. Однако в случае, если расстояние между излучателями меньше, чем длина излучаемой волны, то размеры волновода не оказывают влияния на их взаимную связь.

3.1 Замедляющие волноводные системы типа периодическая «гребенка»

Среди волноводов одним из самых распространенных и простых в исполнении типов замедляющих систем является «гребенка», представляющая собой ряд одинаковых пластин, расположенных с заданным периодом внутри волноводного канала.

Волновод с пластинами может обеспечивать распространение только продольных магнитных ЛМ и продольных электрических волн ЛЕ. Дисперсионные характеристики зависят от высоты периодических элементов структуры. Распространение ЛЕ и ЛМ волн в волноводе возможно рассматривать между плоскостями на основе уравнения Максвелла имеющих вид [102]:

$$\begin{pmatrix} E(x,y,z) \\ H(x,y,z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(x) \\ H(x) \end{pmatrix} \exp[-j(\beta_y y + \beta_z z)] \quad (3.1)$$

для волн LE_q :

$$H_y(x) = A \cos(q\pi x/\omega_0), E_y(x) = 0, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.2)$$

для волн LM_q :

$$H_y(x) = 0, E_y(x) = A \sin(q\pi x/\omega_0), q = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.3)$$

Формулы критического волнового числа (β), замедления волны (n) и число половолн, укладывающихся между плоскостями (q) возможно найти в соответствии с равенством:

$$\beta_y = [\beta_z^2 + (\frac{q\pi}{\omega_0})^2]^{1/2} = (k^2 - \beta_y^2)^{1/2} \quad (3.4)$$

тогда для оси z , значение замедления волны в соответствии с уравнением:

$$n = \frac{\beta_z}{k} = [1 - (\beta_y/k)^2 - (\frac{q\pi}{\omega_0 k})^2]^{1/2} \quad (3.5)$$

Волны типа ЛЕ и ЛМ, распространяющиеся между плоскостями при равном числе половолн, обеспечивают одинаковые дисперсионные характеристики. В случае если $q = 0$, то существует только ЛЕ-волна.

Вне зависимости от высоты периодических пластин (h) справедливыми являются неравенства $\lambda_\pi > 2d$, $\lambda_\pi > 4h$.

Вариант конструкции прямоугольного волновода с внутренней замедляющей системой типа периодическая «гребенка» для электродинамического моделирования представлен на Рисунке 3.1 [103].

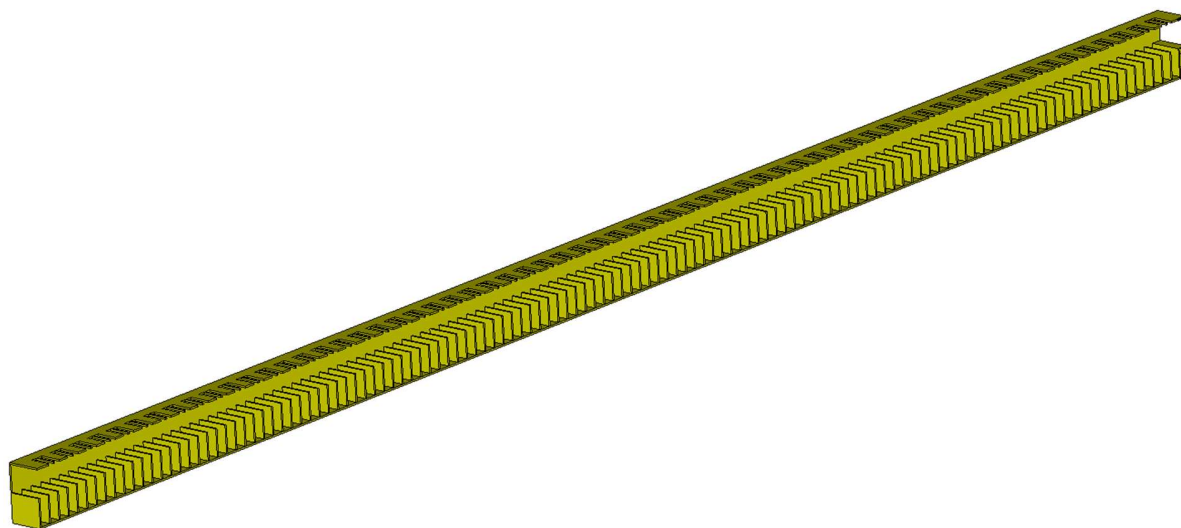
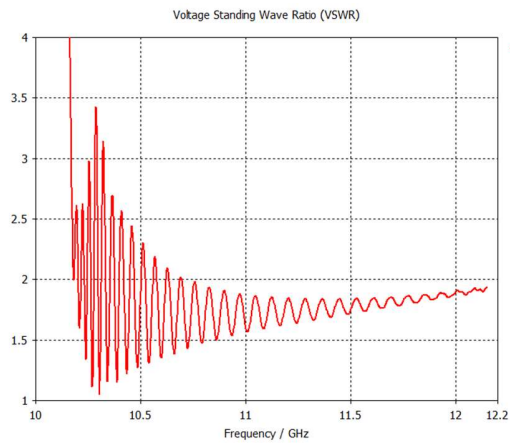
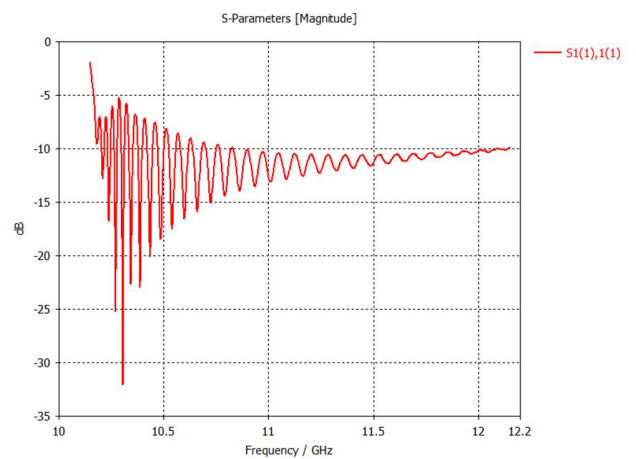


Рисунок 3.1 – Модель прямоугольного волновода с внутренней замедляющей системой типа «гребенка» и парами щелей в широкой стенке волновода, вид в разрезе

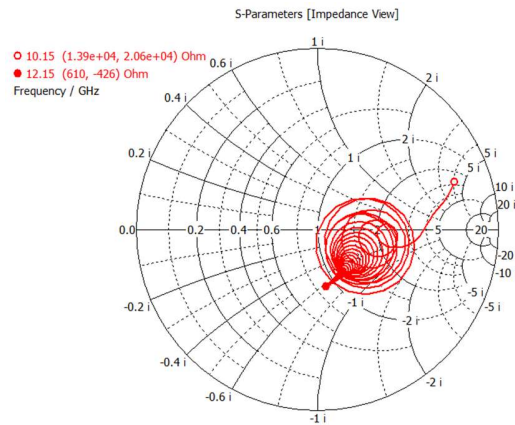
Длина волновода составляют 503.5 мм, внутреннее сечение 21x18 мм, пластины «гребенки» внутри волновода располагаются с периодом 4 мм. Ширина щелей на широкой стенке волновода составляет 2 мм, пары щелей располагаются на расстоянии 0.5 мм друг от друга с периодом 8 мм. Полоса рабочих частот волновода от 10.4 ГГц до 12.15 ГГц. Результаты электродинамического моделирование волновода, представлены на Рисунке 3.2.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Основные характеристики волновода в полосе частот от 10.15 до 12.15 ГГц: а) коэффициент стоячей волны на входе волновода; б) частотные зависимости на входе волновода; в) номограмма Вольперта-Смита для входа волновода

Парное расположение щелей на узкой стенке прямоугольного волновода улучшает характеристики ДН. На Рисунке 3.3 приведены результаты моделирования ДН в зависимости от частоты в диапазоне от 10.15 ГГц до 12.15 ГГц.

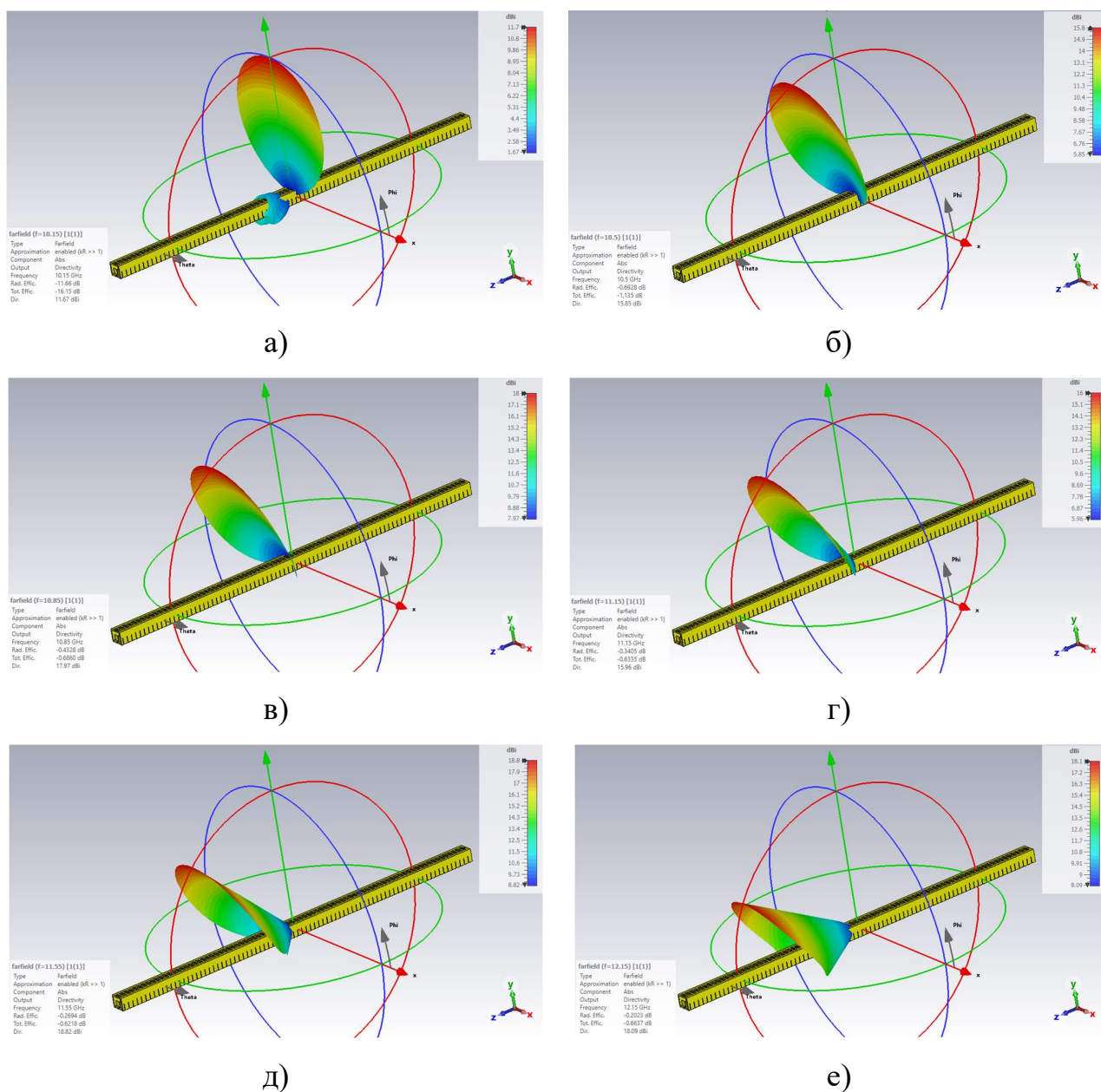


Рисунок 3.3 – ДН прямоугольного волновода с замедляющей системой типа «гребенка» и рядом парных щелей при работе на частоте: а) 10.15 ГГц; б) 10.5 ГГц; в) 10.85 ГГц; г) 11.15 ГГц; д) 11.55 ГГц; е) 12.15 ГГц

По результатам моделирования прямоугольного волновода с внутренней замедляющей системой, демонстрируется сохранение высокого уровня характеристик излучения во всей полосе рабочих частот. Ширина главного луча ДН по уровню -3 дБ составляет менее 3° , при приближении к верхней границе ширина увеличивается до 3° .

В зависимости от частоты удастся обеспечить управление направлением главного луча ДН, его отклонение составляет до 70° относительно нормали.

3.2 Прямоугольные волноводы с замедляющей системой на основе канала в форме меандра

Волноводы с каналом в форме меандра, помимо скользящих плоскостей симметрии, обладают зеркальными плоскостями и перпендикулярными трансляциями. В указанных плоскостях, при соответствии $\varphi=\pi$, будут чередоваться электрические и магнитные стенки.

При условии $\varphi \neq 0, \varphi \neq \pi$ будут описываться бегущие волны в положительном направлении оси z в виде [102]:

$$\begin{bmatrix} E(x, y, z) \\ H(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0(x, y, z) \\ H_0(x, y, z) \end{bmatrix} \exp(-j\beta z) \quad (3.6)$$

Поле волны, бегущей во встречном направлении представлено в виде:

$$\begin{bmatrix} E^*(x, y, z) \\ -H^*(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0^*(x, y, z) \\ -H_0^*(x, y, z) \end{bmatrix} \exp(j\beta z) \quad (3.7)$$

Тогда образуется стоячая волна, поле которой описывается в плоскостях симметрии $z=0, z=Nd$, где каждую компоненту возможно представить, как:

$$E'_i(x, y, z) = 2\cos[(\varphi, d)z - \varphi_i(x, y)]E_{0i}(x, y, z) \quad (3.8)$$

Тогда между стенками укладывается целое число q полуволн, а на сдвиг фаз φ накладывается условие:

$$\varphi = \beta d = \frac{q\pi}{N}, 0 \leq q \leq N \quad (3.9)$$

В соответствии с условием (3.9) осуществляется расчет спектра собственных частот резонаторов, состоящих из одинаковых ячеек в количестве N . При этом период решетки излучающих щелей будет соответствовать уравнению:

$$d_{max} = \frac{\lambda_{min}}{1 + \cos(\theta_{12})} \quad (3.10)$$

где λ_{min} – минимальная длина волны генератора;

θ_{12} – крайние углы сканирования.

Отсчет ведется от линии расположения излучающих элементов, соответственно частотное сканирование будет осуществляться в секторе, отчитываемом от нормали.

$$\lambda_{min} = 300/f_{max} \quad (3.11)$$

$$\theta_{12} = 40\pi/180 \quad (3.12)$$

Основными характеристиками, на основе которых возможно дать оценку волноводу являются фазовая скорость v_{phase} в волноводе:

$$v_{phas} = c/\sqrt{\varepsilon_r - (\frac{\lambda_0}{\lambda_{kr}})^2} \quad (3.13)$$

$$\lambda_0 = C/f_{max} \quad (3.14)$$

$$\lambda_{kr} = 2a/1000 \quad (3.15)$$

где a – размер широкой стенки волновода;

ε_r – показатель диэлектрической проницаемости внутреннего заполнения волновода.

Тогда коэффициент затухания (m) волновода определяется в соответствии с уравнением:

$$m = \frac{793[1+2\frac{b}{a}(\frac{\lambda}{2a})^2]}{b\sqrt{\sigma\lambda[1-(\frac{\lambda}{2a})^2]}} \quad (3.16)$$

где σ – проводимость материала стенок волновода.

В случае, если волновод является частью ФАР, осуществляющей частотное сканирование, то для него вводится дополнительный параметр – углочастотная чувствительность (A):

$$A = \frac{\partial \theta}{\frac{\partial \lambda}{\lambda}} = \frac{0,573}{\cos \theta} (-\gamma_{гр} + \sin \theta) = \frac{0,573}{\cos \theta} (-\frac{1}{\gamma} + \sin \theta) \quad (3.17)$$

Углочастотной чувствительностью обозначается величина угла отклонения главного луча ДН при изменении частоты генератора на 1% [104]. При рассмотрении прямолинейных регулярных волноводов, в составе ВЦАР наблюдается низкий уровень чувствительности $A \ll 1.6$. На уровень углочастотной чувствительности

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. Одним из вариантов достижения высокого уровня углочастотной чувствительности, является конструкция антенного устройства на основе прямоугольного волновода с каналом имеющими форму меандра, и парами периодических излучающих щелей, расположенных поперек узкой стенки.

Результатом параметрического синтеза антенного устройства на основе прямоугольного волновода является ВЦАР с рабочей полосой частот от 12 ГГц до 14 ГГц. На Рисунке 3.4 показан вид волновода в продольном разрезе.

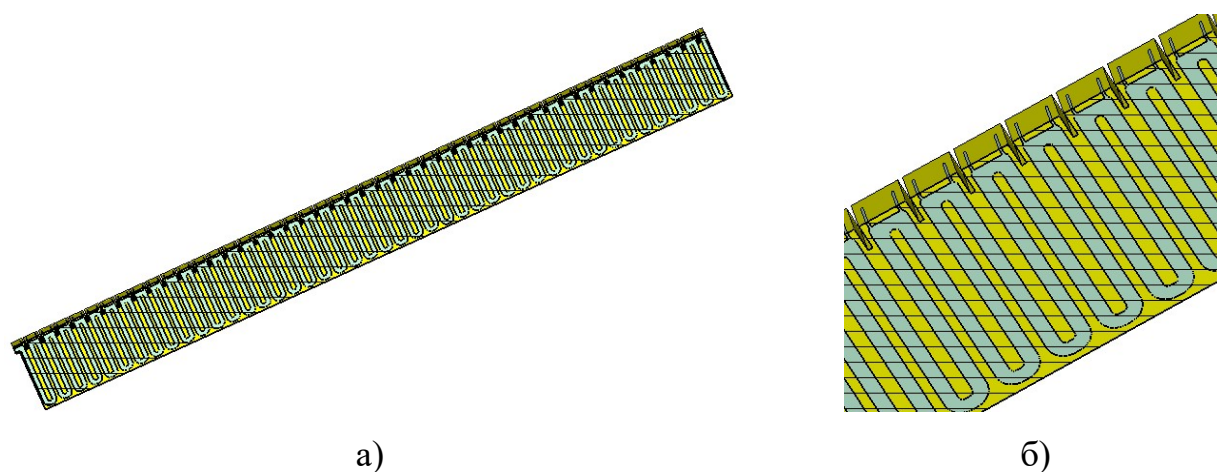
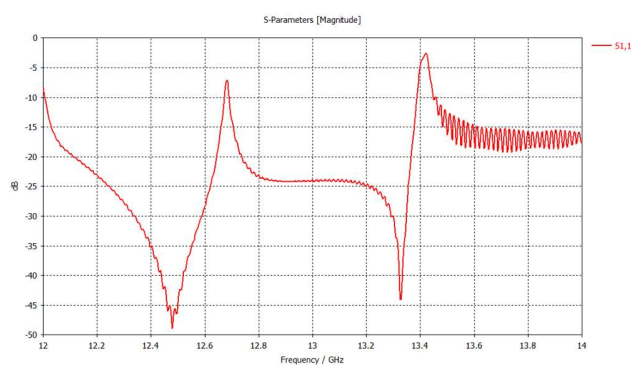
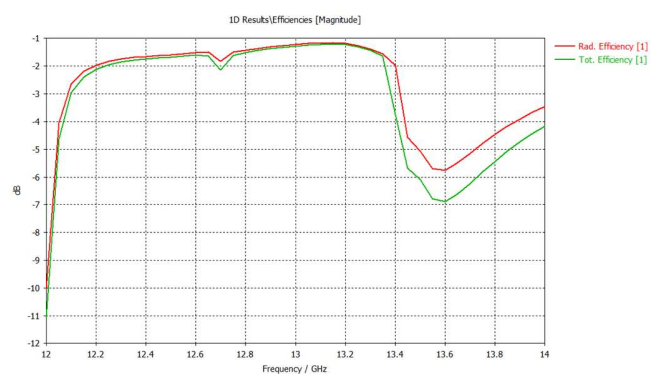


Рисунок 3.4 – Трехмерная модель волновода с каналом в форме меандра и парами периодических излучающих щелей: а) вид в разрезе; б) участок волновода с излучающими щелями в приближенном виде

Конструкция волновода обеспечивает возможность управления направлением главного луча ДН в широком азимутальном секторе, через изменение рабочей частоты. На Рисунке 3.5 приводятся основные характеристик волновода, а на Рисунке 3.6 представлены результат расчета ДН волновода со щелями при выполнении частотного сканирования.

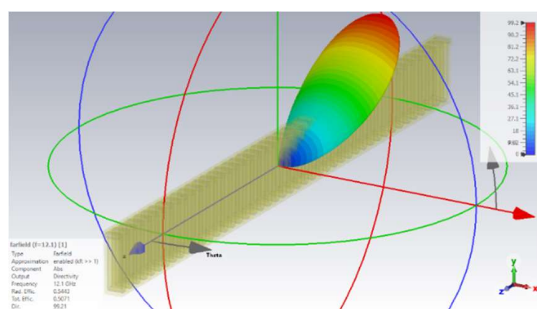


а)

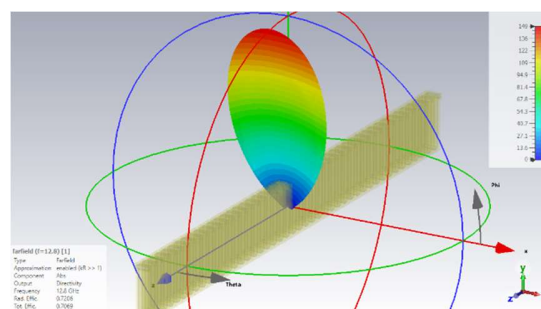


б)

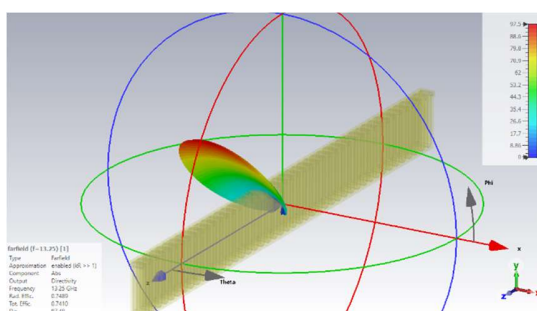
Рисунок 3.5 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик волновода: а) коэффициент отражения на входе волновода; б) Потери в металле и диэлектрике (красная), и суммарные потери, с учетом рассогласования с питающей его полосковой линией (зеленая)



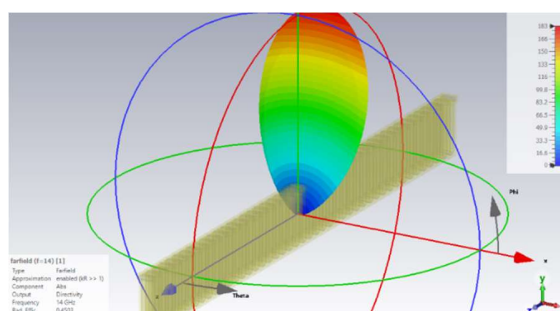
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.6 – ДН волновода с замедляющей системой в форме меандра и рядом парных щелей на стороне узкой стенки на частотах: а) 12.1 ГГц; б) 12.8 ГГц; в) 13.25 ГГц; г) 14 ГГц

На основе численного 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.

3.3 Проектирование линейной антенной решетки с внутренними замедляющими системами

Разработка конструкции АР является затратной по времени и ресурсам работой, поэтому, с целью упрощения определенных этапов разработки, в настоящее время широкое распространение получили современные САПР специализированные на расчете электродинамических характеристик. Однако, программный расчет линейных АР требует большой мощности электронных вычислительных машин. Поэтому в процессе разработки целесообразным является проведение исследований по возможности оптимизации методов проектирования с целью уменьшения трудозатрат.

Проектирование линейной АР возможно свести в несколько основных этапов:

- поиск и анализ информации по антенной решетке с выбором подходящей структурной схемы, в зависимости от требований по форме и габаритным размерам;
- расчет структуры, числа и мощности излучателей в составе антенной решетки;
- выбор типа волноводного излучателя;
- анализ характеристик антенной решетки и её оптимизация в соответствии с техническим заданием;
- проработка конструкции антенной решетки.

По итогам проектирования, разработанная модель антенной решетки будет подготовлена для макетирования и опытных испытаний.

Одним из вариантов конструкции линейных волноводов для замедления фазовой скорости является внедрение внутренних геометрических компонентов, таких как регулярная гребенка, либо формирование волноводного канала синусоидальной формы. Волновод в форме меандра, благодаря физическим свойствам, обеспечивает замедление $u > 1$, регулируемое в широком диапазоне за счет изменения длины $(L + \Delta L_{\text{экв}})$, при этом в зависимости от длины находится углочастотная чувствительность. Серьезными недостатками, ограничивающими применение таких волноводов, является сложность их изготовления и большие массогабаритные размеры.

Волноводный канал в форме меандра взаимодействует с волной типа H_{10} , излучение осуществляется по средствам щелей, прорезанных в одной из стенок волновода. Действующая волноводно-щелевая антенна подключается с двух сторон – на входе имеет соединение с генератором, а с противоположной стороны необходимо согласование с нагрузкой для осуществления функционирования антенного устройства в режиме бегущей волны.

При наличии ряда поперечных щелей в широкой стенке у прямоугольных волноводов в составе ВЩАР, расположенных с определенным периодом, ДН определяются в соответствии с формулами, в плоскости E:

$$F_E(\theta) = \frac{1 \sin[n/2(kd \sin\theta - \psi_1)]}{n \sin[1/2(kd \sin\theta - \psi_1)]} \quad (3.18)$$

тогда в плоскости H ДН определяется по формуле:

$$F_H(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \sin\theta)}{\cos\theta} \quad (3.19)$$

Замедление фазовой скорости, возникающее благодаря каналу волновода в форме меандра, находится в зависимости от длины волны генератора λ , и a размера поперечного сечения волновода в плоскости H.

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (3.20)$$

На основе известных соотношений $v_{\text{гр}}v = c^2$ и $\gamma_{\text{гр}}\gamma = 1$ для волноводов получим замедление групповой скорости:

$$\gamma_{\text{гр}} = 1/\gamma \quad (3.21)$$

Предельная пропускная мощность волновода рассчитывается исходя из размеров поперечного сечения волновода в плоскости Е (b), $E_{\text{пред}}$ допустимое значение напряженности электрического поля в волноводе, при заданных значениях окружающей среды, кВ/см:

$$P_{\text{пред}} = abE_{\text{пред}}^2 / (1,51 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}) \quad (3.22)$$

Важной характеристикой для оценки волновода является коэффициент затухания, где σ обозначается проводимость стенок волновода, дБ/м:

$$\alpha = 793 \left[1 + \frac{2a}{b} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] / b \sqrt{\sigma \lambda \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right]} \quad (3.23)$$

Значение углочастотной чувствительности лежит в относительно узком диапазоне, так как при $\lambda \rightarrow \lambda_{\text{кр}} = 2a(\gamma)$ происходит падение мощности и происходит рост потерь в волноводе.

$$A = \frac{\partial \theta}{\frac{\partial \lambda}{\lambda}} = \frac{0,573}{\cos \theta} (-\gamma_{\text{гр}} + \sin \theta) = \frac{0,573}{\cos \theta} \left(-\frac{1}{\gamma} + \sin \theta\right) \quad (3.24)$$

3.4 Многолучевые антенные решетки на основе квадратных волноводов с внутренними структурами для обеспечения круговой поляризации

При проектировании антенной решетки одним из ключевых размерных параметров является период расположения излучающих щелей d . В целях обеспечения отсутствия боковых лепестков, необходимо определить наиболее точно оптимальный период. Выполнение данного условия обеспечивается при:

$$d \leq d_{\text{max}} = \lambda \frac{1-1/N}{1+|\sin \theta|} \quad (3.25)$$

где N - число излучателей антенной решетки.

При расстоянии между излучателями, соответствующему максимально допустимому, ДН антенной решетки будет обладать только главным лепестком. Важно отметить, что основным условием формирования главного лепестка ДН является расстояние между излучателями. Оно должно быть меньше, чем длина волны, при этом возбуждение излучателей должно быть синфазным, либо близким к этому значению.

Формирование конструкции ФАР на основе волноводов, имеющих заполнение материалом диэлектриком, позволяет достичь и сохранить высокие характеристики устройства в рабочем режиме. При этом важным этапом проектирования конструкции, становится определение оптимальных параметров элементов, в целях обеспечения высокого уровня согласования излучения, и достижения минимизации эффекта затенения.

Если рассматривать бесконечную АР, то эффект ослепления возникает при совпадении фазы поля поверхностной волны и фазового распределения излучающих узких щелей, составляющих АР. Рассматривая реальную АР, ее габаритные размеры ограничены, в связи с чем, при распространении поверхностной волны, происходит ее затухание. При возбуждении единичного элемента АР, окружающие его элементы также оказывают влияние на излучение. Одним из вариантов борьбы с ослеплением АР является минимизация периода расположения ее элементов в совокупности с применением перегородок из метаматериалов. Применение метаматериалов в конструкциях устройств улучшают рабочие характеристик антенн при осуществлении сканирования и дополняют возможности управления излучением [106].

Рассмотрим конструкцию ФАР, разработанную в целях снижения влияния эффекта ослепления в широком секторе обзора и формирования круговой поляризации. Конструкция антенного устройства состоит из квадратных волноводов, соединенных между собой, габаритные размеры которых рассчитаны для обеспечения высокого уровня согласования устройств. На Рисунке 3.7 представлена модель ФАР на основе квадратных волноводов.

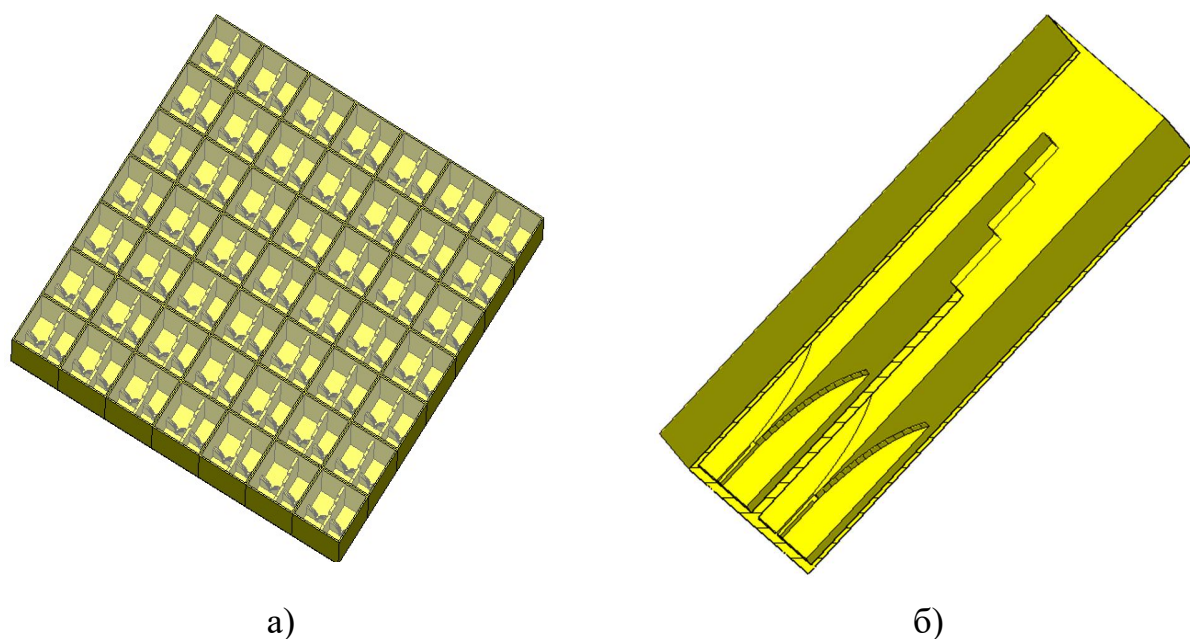
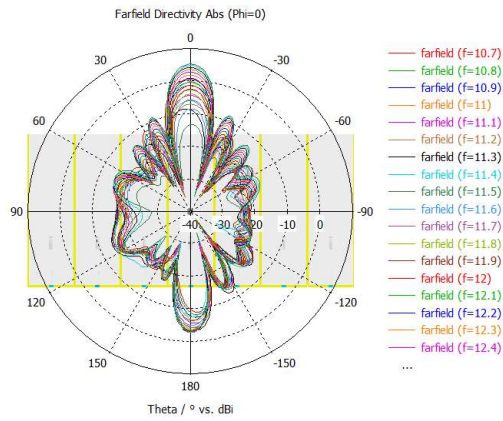
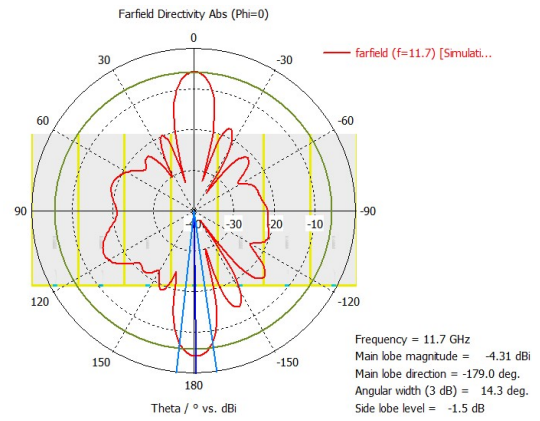


Рисунок 3.7 – Модель ФАР на основе квадратных волноводов: а) вид антенной решетки из 7x7 элементов; б) внешний вид квадратного волновода в разрезе

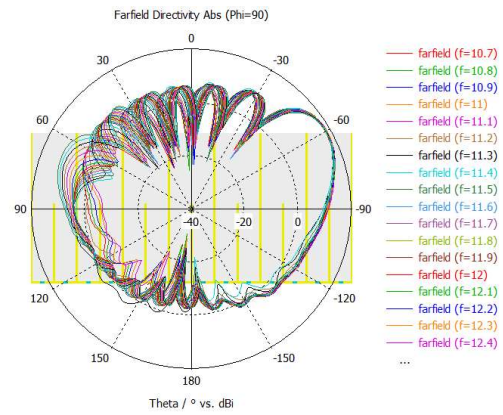
Внутри квадратного волновода для возбуждения волны располагается пара элементов типа Вивальди, имеющих шунтовую запитку от коаксиальных волноводов, с помощью них распространяется излучение ортогональной поляризации. Волновод разделен по центру стенкой, имеющей ступенчатое изменение высоты, рассчитанное в целях достижения параметров, обеспечивающих наилучшее согласование элементов, а также служит для формирования волн с разными скоростями. В целях снижения фазовой скорости, внутреннее пространство волноводов заполнено диэлектрическим материалом – полистиролом, имеющим коэффициент диэлектрической проницаемости 2.6. Параметры волноводов подобраны параметрическим способом для обеспечения емкостного характера входного импеданса волноводного излучателя. Две волны, обладающие ортогональной поляризацией и различными скоростями, формируют волну, обладающую круговой поляризацией. Емкостной характер позволит добиться минимизации эффекта ослепления. На Рисунке 3.8 приводятся полученные в результате моделирования ДН ФАР при работе с действующими нечетными портами.



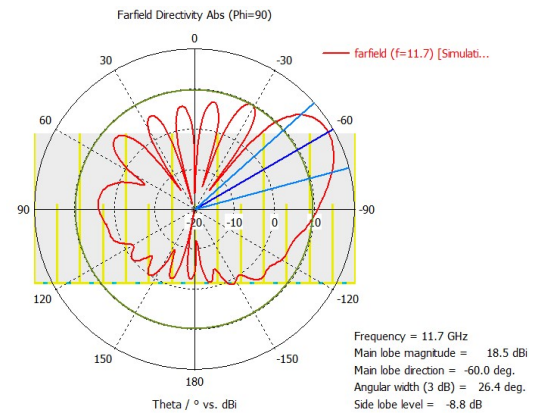
а)



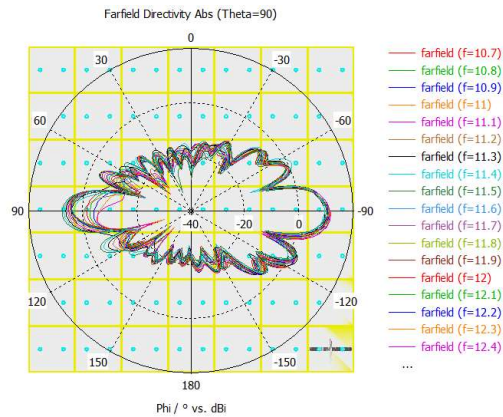
б)



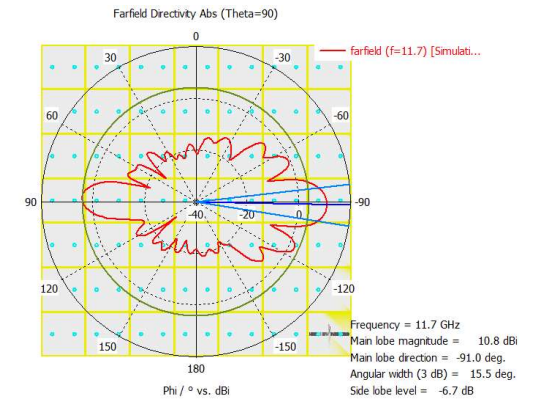
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.8 – Круговая ДН ФАР на основе квадратных волноводов 10.7 ГГц – 12.8 ГГц: а) в плоскости $\Phi = 0^\circ$; б) в плоскости $\Phi = 0^\circ$ на частоте 11.7 ГГц; в) в плоскости $\Phi = 90^\circ$; г) в плоскости $\Phi = 90^\circ$ на частоте 11.7 ГГц; д) в плоскости $\Theta = 90^\circ$; е) в плоскости $\Theta = 90^\circ$ на частоте 11.7 ГГц

Вариант АР на основе квадратных волноводов позволяет осуществлять сканирование в секторе до $\pm 60^\circ$, при сохранении высоких характеристик ДН и устранении эффекта ослепления. Недостатком рассматриваемой системы является сектор обзора, ограничивающий скорость работы при необходимости полноазимутального сканирования и ширина главного лепестка ДН. Рассмотрим ФАР, конструктивные особенности которой позволяют решить данные недостатки.

Цилиндрическая линза Люнеберга является эффективным вариантом для формирования многолучевой ВЦАР. Это обусловлено возможностью одновременного формирования нескольких независимых лучей в широком азимутальном секторе. Плоская форма антенной решетки обладает существенным недостатком – при отклонении главного луча ДН от нормали, эффективная площадь апертуры снижается, а также появляется вероятность возникновения местного эффекта ослепления ФАР.

На Рисунке 3.9 представлена конструкция ВЦАР на основе плоской линзы Люнеберга имеющей форму половины цилиндра, что позволяет достичь сектора сканирования, составляющего 180° . Полоса рабочих частот рассматриваемой антенной системы находится в диапазоне от 9 ГГц до 10 ГГц.

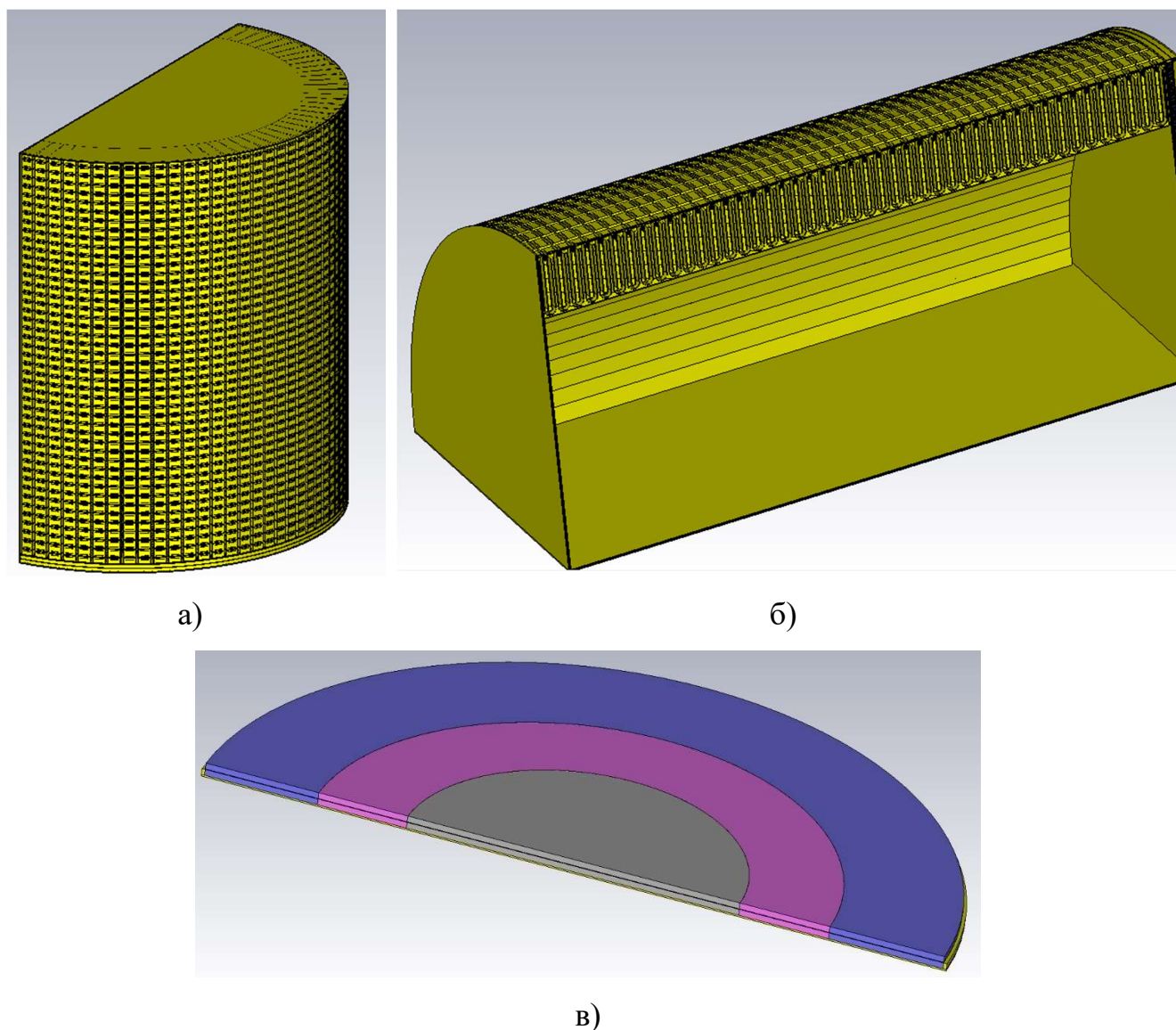


Рисунок 3.9 – Модель волноводно-щелевой антенной решетки в форме половины цилиндра, с питанием антенной системы на основе плоской линзы Лüneберга:

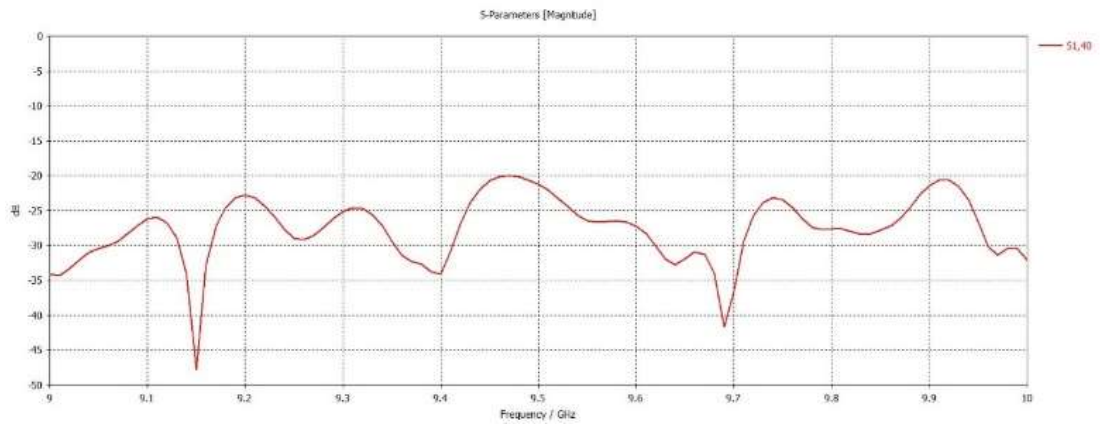
а) общий внешний вид; б) вид в разрезе; в) вид плоской линзы Лüneберга

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

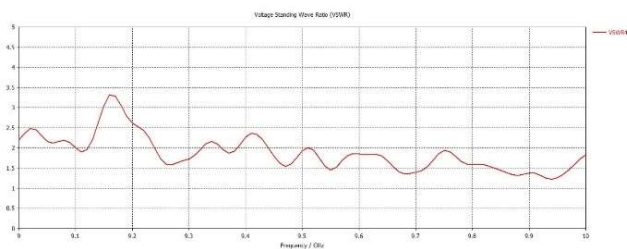
диэлектрической проницаемости составляет 2.5. Наиболее оптимальным материалом для формирования центральной части линзы является полистирол. Помимо его соответствия требуемым характеристикам, он является относительно дешевым и доступным. Центральное полукольцо линзы имеет ширину 82 мм и обладает диэлектрической проницаемостью 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 Люнеберга 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 Люнеберга примыкают патч-элементы питания которых осуществляется через 79 коаксиальных входа антенной системы. Угловой сектор диаграммообразования составляет 180°.

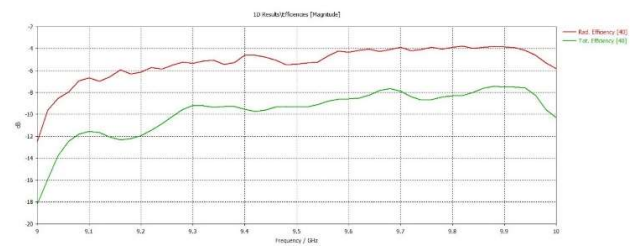
Программное обеспечение CST Studio Suite 2025 обладает встроенными функциональными возможностями для осуществления оптимизации параметров модели антенного устройства в целях получения наилучших характеристик излучения. Целью оптимизации параметров антенного устройства, является получение узконаправленных ДН. По результатам оптимизации антенного устройства получены расчетные значения основных характеристик устройства при осуществлении работы одним из волноводов (волновод № 40), они представлены на Рисунке 3.10.



а)



б)



в)

Рисунок 3.10 – результаты электродинамического моделирования основных характеристик антенной решетки: а) коэффициент отражения на входе волновода; б) КСВН на входе волновода, находящегося в составе решетки (волновое сопротивление фидерной линии - 50 Ом); в) КПД элемента, находящегося в составе решетки: линия с кружками – потери в материалах, линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР

Частотное сканирование осуществляется с применением волноводов в работе по отдельности. На Рисунке 3.11 приводится результат расчета ДН щелевого волновода из состава антенной решетки при выполнении частотного сканирования (в работе задействован волновод №40).

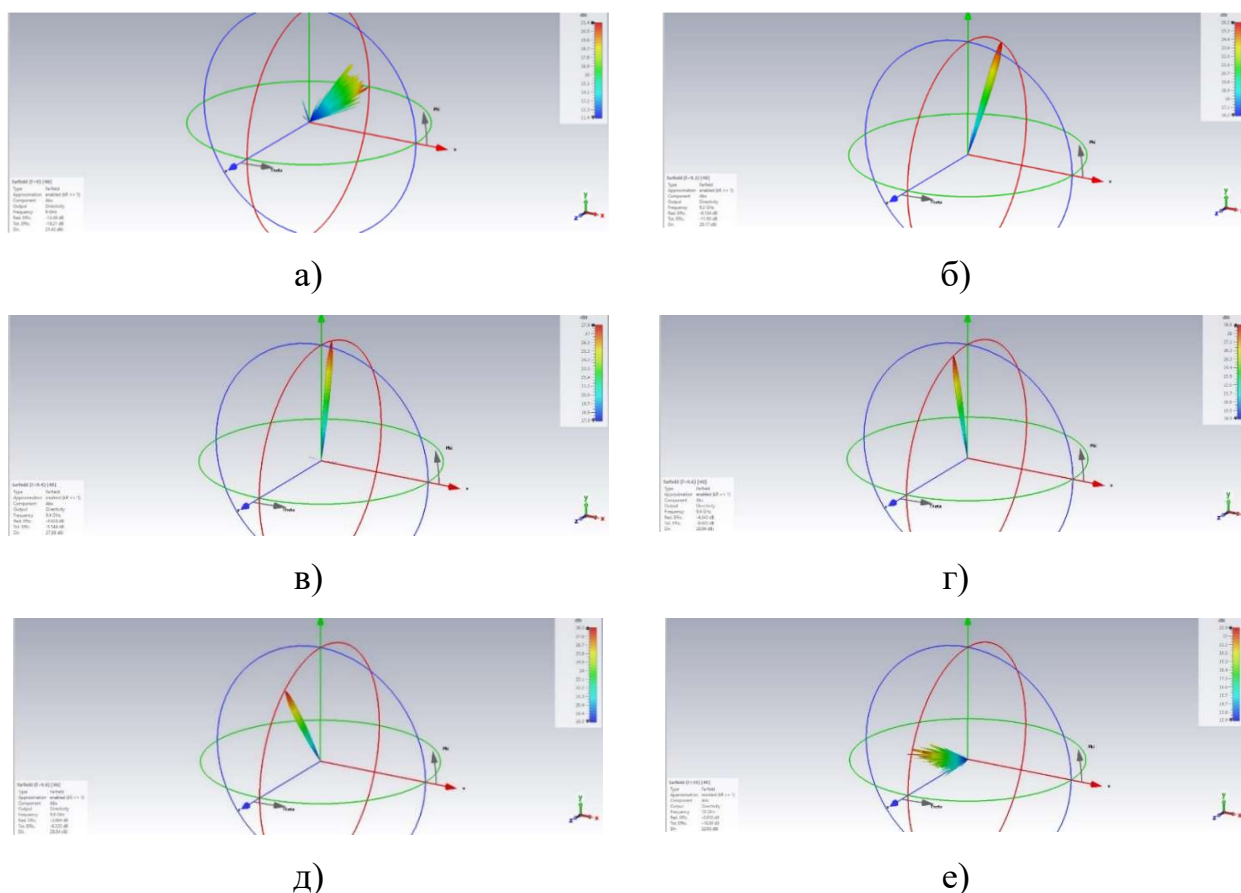


Рисунок 3.11 – ДН антенной системы в частотном диапазоне от 9 до 10 ГГц при осуществлении частотного сканирования: а) 9 ГГц; б) 9.2 ГГц; в) 9.4 ГГц; г) 9.6 ГГц; д) 9.8 ГГц; е) 10 ГГц

Полученная по результатам электродинамического моделирования ДН, при частотном сканировании в полосе рабочих частот, демонстрирует высокие значения КНД, узкий главный лепесток ДН и низкий УБЛ. Таким образом, путем программной оптимизации параметров антенного устройства были получены оптимальные параметры модели, позволяющие достичь высоких характеристик, при осуществлении его работы в качестве сканирующего устройства. Соединение двух антенных устройств позволяют обеспечить сектор сканирования, составляющий 360° .

3.5 Исследование и разработка конструкции антенных решеток на основе линзы Ротмана и волноводно-щелевых элементов с внутренними замедляющими системами

При разработке ФАР с двухкоординатным широкоугольным сканированием, основными параметрами, определяющими его форму и структуру, становятся стоимость и массогабаритные параметры. При ограниченных ресурсах и связанных с ними возможностях производства, рациональным вариантом компонента ДОУ является линза Ротмана. Изготовление линзы возможно осуществить с применением технологии печатных плат, при этом форма линзы Ротмана позволяет разместить усилители высоких частот в каналах устройства с целью повышения чувствительности радиоустройства. Такие линзы позволяют обеспечить работу в широком диапазоне частот при осуществлении сканирования в секторе 90° и более градусов [107].

Модель антенной системы, основой которой выступает линза Ротмана, представлена на Рисунке 3.12. Линейный элемент ФАР – представляет собой 25 прямоугольных волноводов с замедляющей структурой типа «гребенка» на нижней узкой стенке. Узкие стенки разрезаны в целях упрощения изготовления, при этом две половинки волновода возможно не соединять, при условии, что зазор между ними составляет около 0.1 мм.

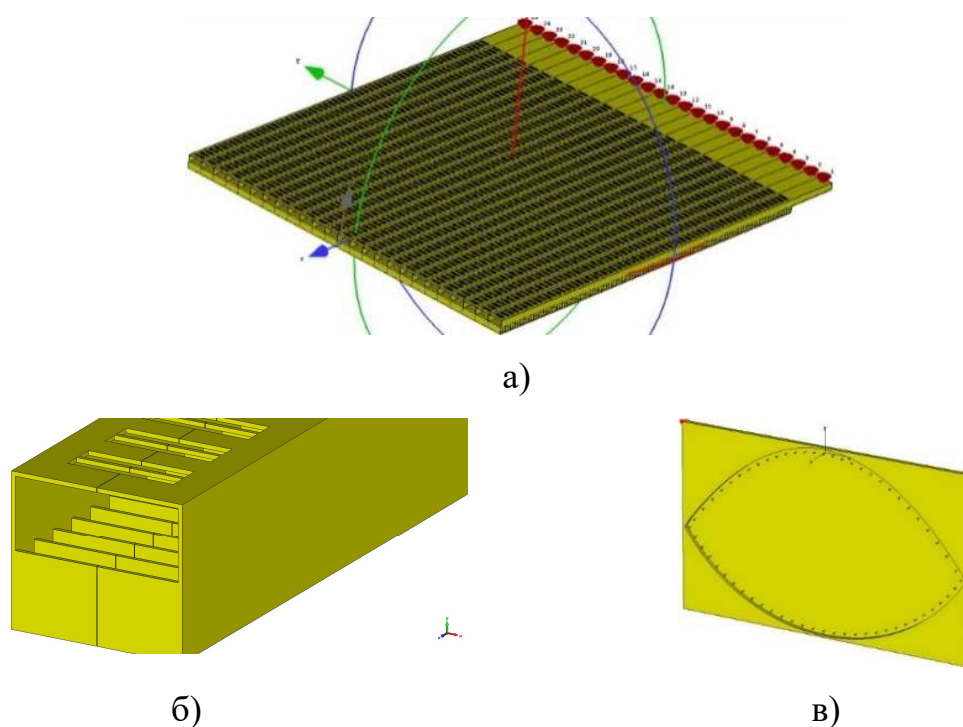


Рисунок 3.12 – Модель ФАР на основе линзы Ротмана и массива прямоугольных волноводов: а) общий вид ФАР; б) вид прямоугольного волновода; в) внешний вид линзы Ротмана

Структура антенного устройства позволяет осуществить сканирование коммутационным методом, используя отдельные каналы в составе линзы Ротмана для питания волноводов. Помимо этого, управление ДН антенны возможно осуществить с помощью перестройки частоты. На основе оптимизированной модели ФАР был произведен расчет ДН в диапазоне частот от 7.55 ГГц до 9 ГГц. На Рисунке 3.13 представлены ДН на частоте 8.2 ГГц при работе нескольких отдельных каналов.

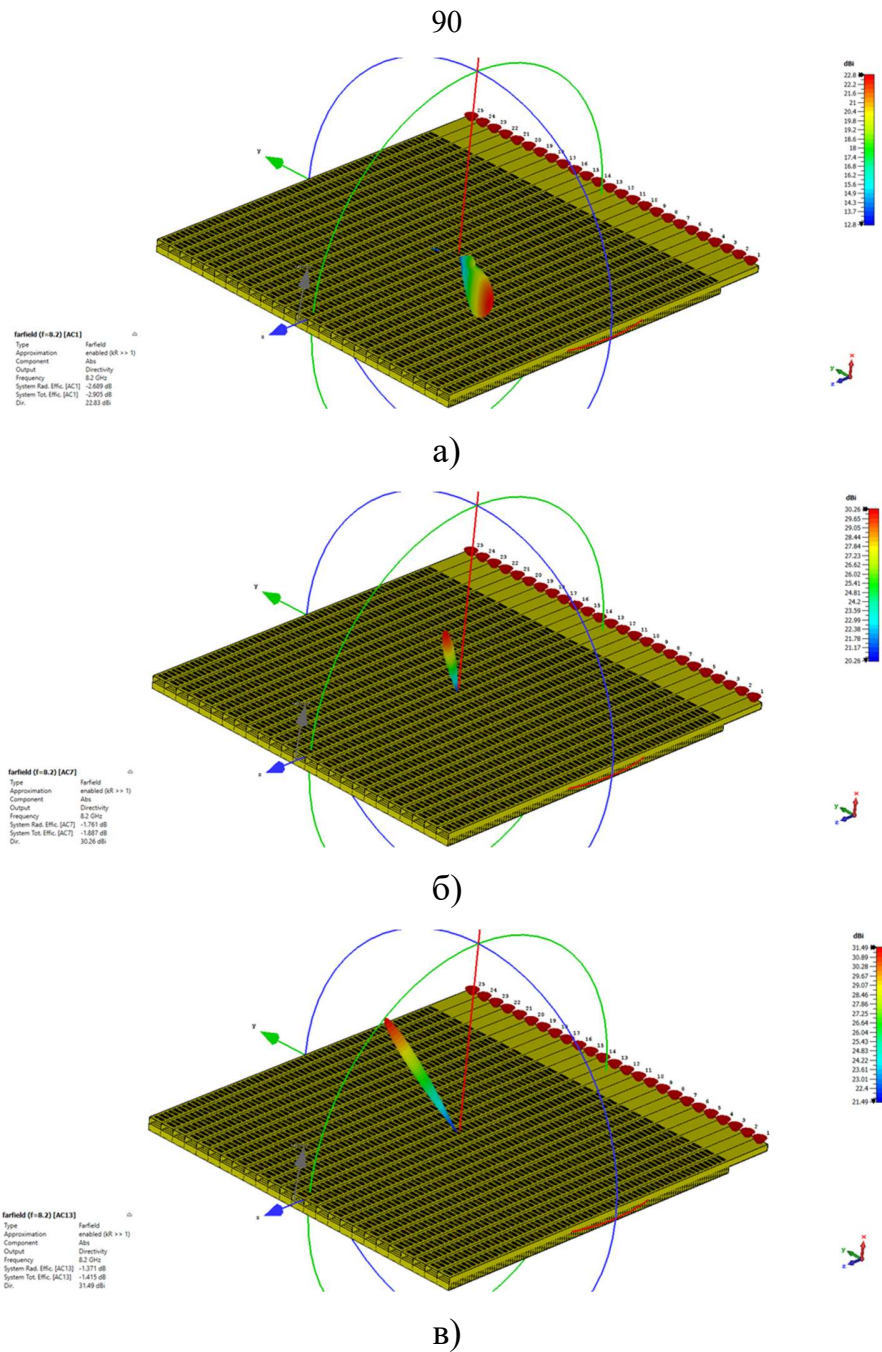


Рисунок 3.13 – Результаты расчета ДН на частоте 8.2 ГГц при работе отдельных портов: а) порт 1; б) порт 7; в) порт 13

Устройство формирует ДН игловидной формы, направление главного лепестка которой возможно изменять в широком секторе сканирования. Антенное устройство обладает симметрией, поэтому характеристики волноводов с 1 по 12 имеют сходные значения с характеристиками волноводов с 25 по 14. Сектор коммутационного

сканирования по азимуту составляет 90° . Недостатком антенного устройства являются временные задержки, возникающие при передаче сигнала между портами линзы Ротмана и элементами антенной решетки, соединенной с ней. В Таблице 3.1 указаны временные задержки для всех портов линзы Ротмана.

Таблица 3.1 – Временные задержки между портами линзы Ротмана и элементами АР

Номер порта линзы Ротмана	Временная задержка, нс	Номер порта линзы Ротмана	Временная задержка, нс
34	0.08697	60	0.00116
35	0.08473	59	0.00461
36	0.07866	58	0.01022
37	0.06991	57	0.01776
38	0.05953	56	0.02694
39	0.04841	55	0.03733
40	0.03733	54	0.04841
41	0.02694	53	0.05953
42	0.01776	52	0.06991
43	0.01022	51	0.07866
44	0.00461	50	0.08473
45	0.00116	49	0.08697
46 – центральный	0		

Рассмотрим изменение формы ДН в зависимости от частоты при осуществлении частотного сканирования центральным волноводом. Результат расчета ДН представлен на Рисунке 3.14.

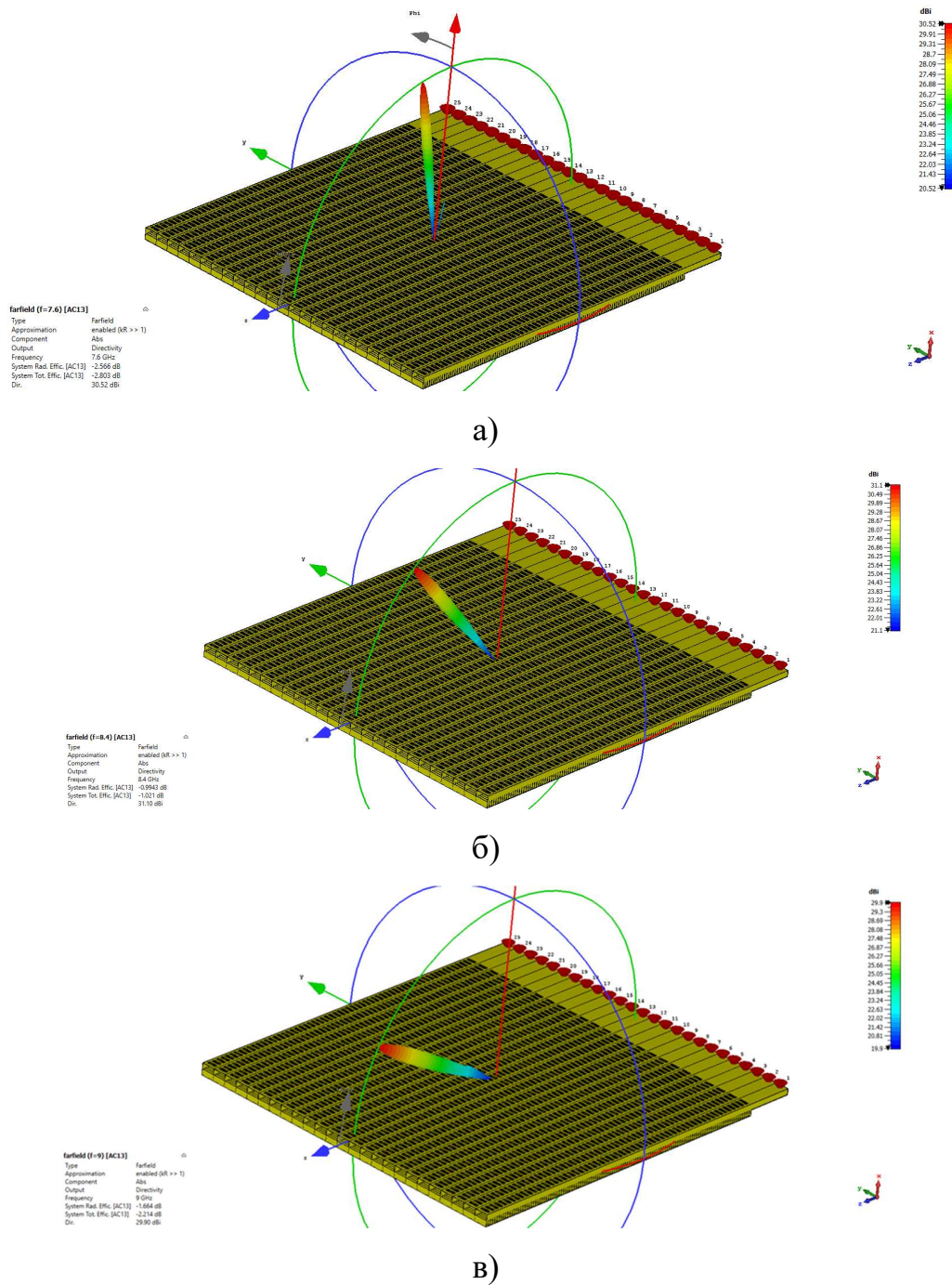


Рисунок 3.14 – Результаты расчета ДН при осуществлении частотного метода сканирования на частотах: а) 7.6 ГГц; б) 8.4 ГГц; в) 9 ГГц

По результатам моделирования сектор обзора по углу места составляет более 60° при изменении частоты от 7.55 ГГц до 9 ГГц. Полученные в результате

моделирования характеристики ДН на некоторых частотах рабочего диапазона представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – результаты моделирования ДН в рабочем диапазоне частот

Частота, ГГц	7.55			8.2			9		
Номер входа линзы Ротмана	System Rad. Effic. dB	System Tot. Effic. dB	Dir., dBi	System Rad. Effic. dB	System Tot. Effic. dB	Dir., dBi	System Rad. Effic. dB	System Tot. Effic. dB	Dir., dBi
1	-7.436	-7.728	24.99	-2.689	-2.905	22.83			
2	-8.080	-9.028	25.70	-2.808	-3.126	25.17			
3	-7.965	-8.057	26.85	-2.056	-2.165	27.97			
4	-7.992	-8.270	27.84	-2.178	-2.285	29.01			
5	-7.931	-8.127	28.26	-2.059	-2.229	29.56	-3.266	-3.350	23.35
6	-7.716	-7.931	28.56	-1.953	-2.059	29.96	-3.710	-3.865	25.29
7	-7.373	-7.552	28.89	-1.761	-1.887	30.26	-2.640	-2.829	27.07
8	-7.367	-7.502	29.22	-1.493	-1.622	30.61	-2.415	-2.760	26.84
9	-7.312	-7.562	29.52	-1.350	-1.450	30.94	-2.438	-2.507	27.38
10	-7.477	-7.525	29.77	-1.303	-1.380	31.29	-2.146	-2.370	29.15
11	-7.310	-7.812	29.94	-1.212	-1.331	31.46	-2.195	-2.370	30.00
12	-7.297	-7.347	30.25	-1.400	-1.470	31.48	-2.048	-2.094	29.92
13	-6.041	-7.923	30.27	-1.371	-1.415	31.49	-1.664	-2.214	29.90

ВЩАР на основе гребенчатых замедляющих структур на дне нижней широкой стенки, являющиеся линейными элементами плоской ФАР, конструктивно являются более простыми и доступными для производства, чем ВЩАР на основе волноводов, имеющих форму меандра.

Производство волноводов требует наличие определенного уровня технологических мощностей, поэтому рассмотрим альтернативные варианты структур антенных решеток, не требующих сложного фрезеровочного оборудования. В качестве примера рассмотрим конструкцию фазированной дифракционной решетки с постоянным периодом, имеющим профиль в виде треугольников (конструкция эшелетт). В работе [108] предлагаются варианты построения устройств с применением решетки эшелетт на основе технологии апланатической линзы [109],

[110]. При применении апланатической линзы в конструкции устройства требуется использовать усилители, поэтому рассмотрим более простой вариант антенной решетки с использованием линзы Ротмана не требующий дополнительных элементов. На Рисунке 3.15 представлена модель ФАР на основе линзы Ротмана с дифракционной решеткой и расположенными поверх нее линиями Губо.

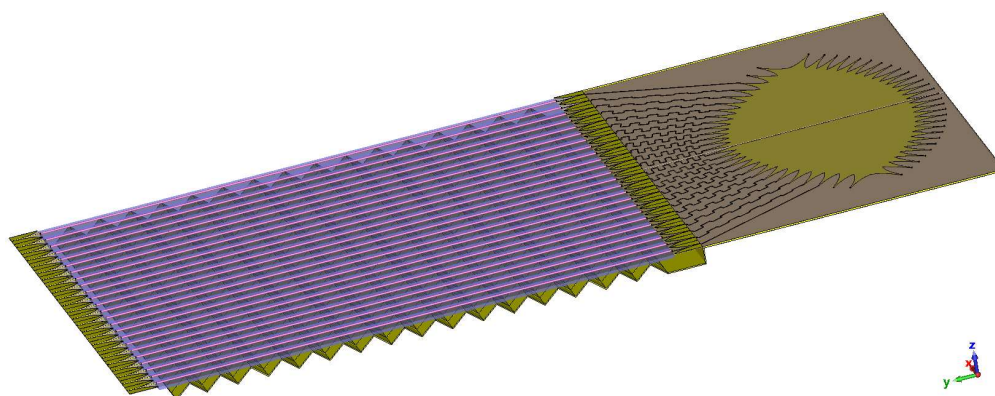
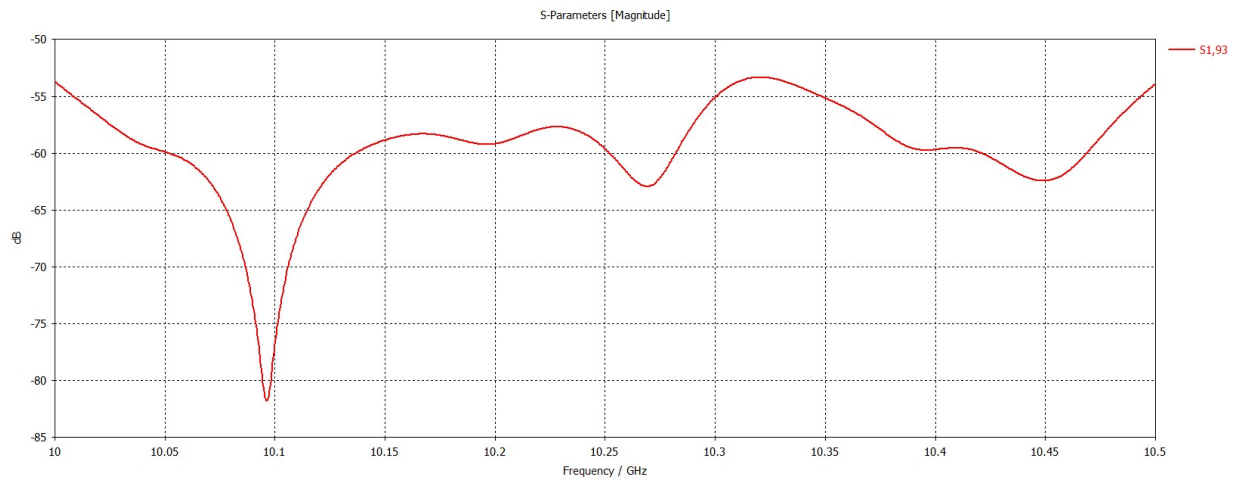
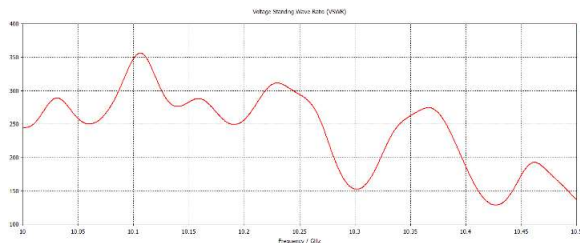


Рисунок 3.15 – Модель ФАР на основе линзы Ротмана и дифракционной решетки эшелетт

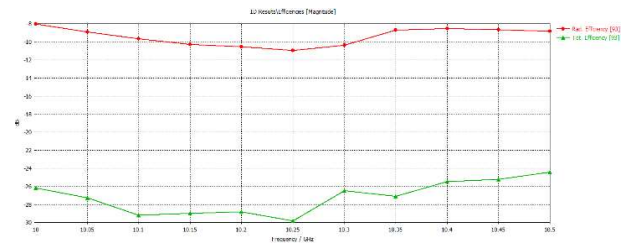
Габаритные размеры антенного устройства составляют 590x288x12 мм, что позволяет разместить его в плоскости параллельной поверхности объекта носителя, а также установить внешний корпус-обтекатель для уменьшения сопротивления воздуха. Линза Ротмана, выступающая в качестве ДООУ, имеет 33 входных порта с помощью которых, помимо частотного сканирования, возможно осуществить электронное сканирование. Решетка эшелетт выполнена из тонкого металла и имеет сверху пластину из пенопласта, коэффициент диэлектрической проницаемости которого составляет 1.2. Линии Губо располагаются над диэлектрической пластиной, и представляют собой медные проводящие линии, имеющие диаметр 0.4 мм и внешнее покрытие из полиэтилена диаметром 1.2 мм. На Рисунке 3.16 приводятся основные характеристики, полученные при моделировании антенной решетки.



а)



б)



в)

Рисунок 3.16 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик антенной решетки при работе коммутационного порта 93: а) коэффициент отражения на входе волновода; б) КСВН на входе волновода, находящегося в составе решетки (волновое сопротивление фидерной линии - 50 Ом); в) КПД элемента, находящегося в составе решетки: линия с кружками – потери в материалах, линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР.

Антенна обладает конструкцией, обеспечивающей возможность частотного сканирования в угломестной плоскости и коммутационным способом по азимуту. Рассмотрим изменения ДН при осуществлении частотного сканирования, они представлены на Рисунке 3.17.

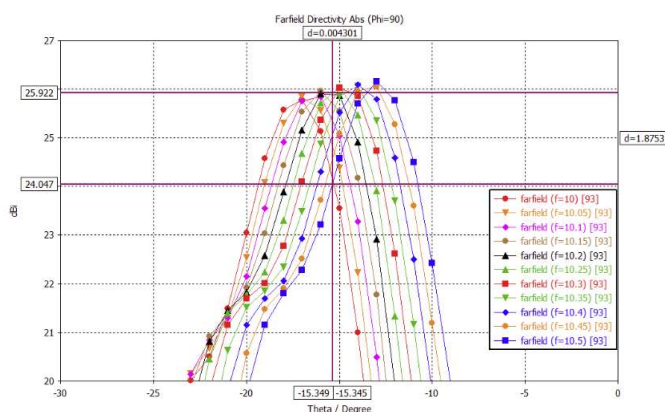


Рисунок 3.17 – ДН ФАР на основе линзы Ротмана и дифракционной решеткой эшелетт

Полученные результаты демонстрируют возможность обеспечивать частотное сканирование в полосе частот от 10 ГГц до 10.5 ГГц, при это уровень потерь не превышает 1÷1.3 дБ, коэффициент усиления ФАР изменяется меньше, чем на 2 дБ, что подтверждает возможность излучения и приема ЛЧМ сигналов. Конструкция антенны обладает небольшой массой и габаритными размерами, поэтому она может быть использована в составе систем, устанавливаемых на летательные аппараты.

3.6 Методика реализации антенных решеток на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования

Основными этапами методики проектирования антенных систем на основе периодических структур для осуществления широкоугольного сканирования являются:

1. Выбор и разработка элементов антенной системы, основой которой выступают периодические структуры, такие как прямоугольные волноводы, имеющие внутренние замедляющие системы и ряды периодических излучающих щелей. Определение основных параметров и предельных характеристик проектируемой системы при осуществлении частотного сканирования. Определение вида диаграммообразующей системы, обеспечивающей реализацию метода

коммутационного сканирования. Выбор варианта линии возбуждения в составе конструкции антенного устройства, требуемой для минимизации потерь.

2. Анализ характеристик антенных решеток на основе метода конечного интегрирования Вейланда, с помощью пакета численного электродинамического моделирования CST Studio Suite 2025. Определение возможности упрощения модели устройства для проведения параметрического синтеза.

2.1 Определение оптимальных параметров сетки для проведения анализа модели и выбор числа разбиения на ячейки сетки элементов модели для получения корректных по точности результатов. Проверка сходимости результатов в зависимости от параметров сетки, определение оптимального для расчетов числа разбиения сетки.

3. Расчет основных характеристик упрощенной модели антенного устройства и определение граничных параметров. Осуществление процесса оптимизации параметров электродинамической модели для получения наилучших характеристик устройства с помощью параметрического синтеза.

3.1 Определение основных критериев оптимизации, выбор схемы питания для обеспечения работы устройства в режиме частотно-коммутационного сканирования. Расчет методом параметрического синтеза оптимальных размеров периодических элементов и периода их расположения для обеспечения согласованности элементов.

3.2 Первоначальное приближение параметров антенной решетки, на основе упрощенной модели без учета параметров обтекателя, для расчетов используется упрощенная модель нагрузок и портов.

4. Определение параметров упрощенной модели для изготовления макета разрабатываемого антенного устройства. Определение влияния погрешностей в размерах элементов модели на характеристики антенны. Подготовка к проведению экспериментальных исследований и проведения измерений основных характеристик устройства.

5. Изготовление макета антенны для проведения натурных испытаний. Верификация полученных результатов измерений макета антенного устройства, со значениями, полученными в результате электродинамического моделирования упрощенной модели.

6. Проверка необходимости использования метаматериальных элементов для компенсации негативных эффектов, и возможности улучшения характеристик антенного устройства.

6.1 Оценка влияния эффекта ослепления на работу устройства в режимах частотного и коммутационного сканирования.

7. Корректировка макета антенны на основе проведенных исследований, в целях повышения характеристик и уменьшения влияния на работу устройства негативных эффектов, сопоставление результатов измерений с электродинамической моделью в САПР.

3.7 Выводы по главе третьей

В главе рассматриваются варианты построения антенных решеток особенностью которых являются периодические структуры, обеспечивающие возможность осуществлять частотное сканирование. В совокупности с диаграммообразующими системами, такими как линза Ротмана или линза Люнеберга, становится возможным реализовывать двухкоординатное частотно-коммутационное сканирование.

Продemonстрировано, что применение в качестве диаграммообразующего устройства плоского варианта линзы Люнеберга или линзы Ротмана, выполненной с применением технологии печатных план, позволяет обеспечить низкие потери при осуществлении коммутационного сканирования в широком секторе углов. В целях повышения характеристик антенного устройства, применяется метод параметрического синтеза, с его помощью становится возможным достижение наиболее высокого уровня согласования элементов.

Предложены варианты прямоугольных волноводов с внутренними замедляющими системами и парами периодических щелей, конструкция которых за счет снижения фазовой скорости позволяет повысить характеристики частотного сканирования, обеспечивая малые потери и низкий уровень боковых лепестков.

Предложен вариант антенной решетки с диграммообразующей системой на основе плоской двухслойной линзы Люнеберга. Синтез линзы выполнен на основе практического применения теории связанных волн, структура представляет собой два связанных между собой планарных диэлектрических волновода. Металлический экран, разделяющий диэлектрические пластины, обеспечивает наиболее полный переход электромагнитной волны из одной части в другую. Структурные особенности линзы полученной по результатам оптимизации, обеспечивают работу антенного устройства в секторе сканирования до 180° . Конструкция волноводов содержит внутренние замедляющие структуры, состоящие из рядов периодических пластин, и заполнение канала материалом диэлектриком, что в совокупности с рядами периодических щелей, расположенных на стороне узкой стенки, обеспечивает снижение фазовой скорости волны, распространяющейся в волноводном канале. Конструкция волноводов в совокупности с линзой обеспечивает возможность осуществления частотно-коммутационного многолучевого сканирования в угломестной и азимутальной плоскости в широком секторе при формировании узкого лепестка ДН.

Показаны варианты антенных решеток на основе линзы Ротмана, обеспечивающей возможность коммутационного сканирования многолучевой антенной системы. Продемонстрирована высокая эффективность частотно-коммутационного сканирования и сохранение узкого лепестка ДН при применении антенных решеток, состоящих из прямоугольных волноводно-щелевых элементов с внутренними замедляющими системами или дифракционной решетки эшелетт. Конструкция рассмотренных антенных решеток позволяет обеспечить небольшие габаритные размеры устройства.

4. Исследование и разработка антенных устройств с частотным сканированием на основе планарных элементов

Среди систем связи определенное распространение имеют планарные антенны, структура которых представляет собой плоский волновод на основе материала диэлектрика, соединенный с конструкцией, представляющей собой дифракционную решетку [70], [111], [112]. Одним из вариантов планарных антенн являются АВВ.

Работа планарной антенны основана на эффекте преобразования поверхностных волн в объемные, и объемных волн в поверхностные, внутри структуры волновода, и соединенной с ним дифракционной решеткой [111], [112]. На основе данного эффекта проектируются антенные устройства, обладающие высокими техническими характеристиками в сравнении с полосковыми и микрополосковыми антенными решетками [113], [114].

Планарная антенна на основе плоского диэлектрического волновода является распространенным решением при конструировании структуры приемо-передающего устройства. Центральной частью конструкции выступают проводящие структуры, расположенные на внешней поверхности диэлектрического материала. Планарная антенна позволяет обеспечить работу в широком диапазоне частот, а также обладает высокими характеристиками передающего излучения, при относительной простоте конструкции.

4.1 Построение ленточной решетки на основе антенны вытекающей волны

Структура АВВ представляет линию передачи, на основе прямоугольного волновода, содержащего продольную щель на стороне узкой стенки. Альтернативный вариант конструкции АВВ является структурой медленных волн на поверхности которой располагаются периодические полосы [104]. Однородные АВВ формируют основной лепесток ДН в направлении распространения волны возбуждения, а прочие варианты АВВ позволяют изменить его направленность на противоположную [105].

Для АВВ на основе прямоугольного волновода, направление главного лепестка ДН (угол θ) определяется в соответствии с формулой:

$$\cos \theta = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} = \frac{c}{v_\phi} < 1, \quad (4.1)$$

где λ_0 – рабочая длина волны;

λ_B – длина волны в волноводе;

c – скорость света в свободном пространстве;

v_ϕ – фазовая скорость волны в волноводе.

При рассмотрении антенного устройства, конструкция которой включает в себя периодическую структуру, направление главного лепестка ДН при «быстрых» волнах определяется в соответствии с формулой:

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} = p, p < 1, \quad (4.2)$$

тогда для конструкций, работающих с «медленной» волной, направление главного луча ДН соответствует выражению:

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} + n \frac{\lambda_0}{d} = p + n \frac{\lambda_0}{d}, p = -1, \quad (4.3)$$

Главный луч ДН имеет направление вдоль антенного устройства. Коэффициент n соответствует номеру пространственной гармоники поля излучения. Антенное устройство демонстрирует наилучшие характеристики при работе в одноволновом режиме. На Рисунке 4.1 представлены варианты АВВ, основанные на прямоугольном волноводе и плоском диэлектрическом волноводе с периодической дифракционной решеткой.

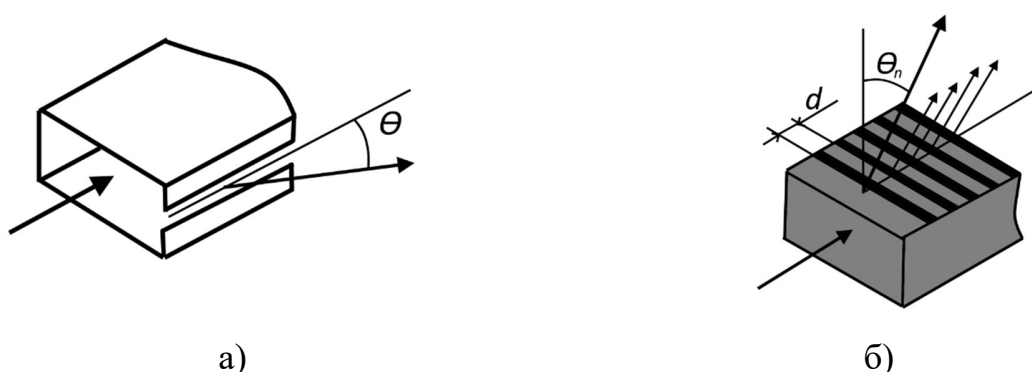


Рисунок 4.1 – Варианты АВВ: а) на основе прямоугольного волновода; б) на основе плоского диэлектрического волновода с периодической структурой

В соответствии с (4.1) и (4.2) видно, что сканирование осуществляется за счет изменения частоты или при изменении периода неоднородностей. Плоский волновод с периодической структурой формирует ДН в зависимости от типа волны: в сторону нагрузки при формировании стоячей волны, либо в сторону элемента возбуждения при обратной волне. Данный тип антенных устройств обладает высоким КПД и способностью формировать ДН с низким УБЛ [115]. Конструкция антенного устройства обладает простой формой, что упрощает производство, а также позволяет осуществлять частотное сканирование.

В настоящее время АВВ имеют распространение среди систем связи благодаря отсутствию ограничений в диапазоне КВЧ. Относительно простая конструкция на основе плоского диэлектрического волновода делает данную технологию доступной для производства. Развитие технологии ленточных дифракционных антенных решеток прошло длинный путь, в процессе которого были разработаны различные методы анализа, например, метод Римана-Гилберта [111] или метод коллокации [116].

С целью анализа одномерных ленточных структур рассмотрим метод коллокации. Особенностью метода является возможность его применения совместно с интегральными уравнениями, однако он обладает низкой сходимостью. Способ

расчета математической модели дифракционной плоской однородной планарной ленточной дифракционной решетки приводится в работах [117], [118].

В целях уменьшения профиля антенного устройства на основе планарного волновода возможно применять режим торцевого возбуждения. При работе в данном режиме поверхностная волна распространяется вдоль оси устройства. Эффект дифракции, возникающий на элементах дифракционной решетки, формирует ДН перпендикулярную плоскости волновода, угол которой изменяется в соответствии с (4.2), и определяется по формуле:

$$\sin \theta_{nmax} = \frac{\beta_n}{k_0} \approx \frac{\beta}{k_0} + \frac{2\pi n}{k_0 d} = \gamma(\lambda_0) + \frac{n\lambda_0}{d}, \quad (4.4)$$

где n – номер пространственной гармоники (условия выполняются с отрицательными номерами);

β – фазовая постоянная основной пространственной гармоники;

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число свободного пространства;

d – период решетки;

λ_0 – рабочая длина волны;

$\gamma(\lambda_0) = \frac{c}{v_{\phi}(\lambda_0)}$ – замедление фазовой скорости поверхностной волны плоского

диэлектрического волновода.

На основе выражения (4.4) видно, что возможно реализовать немеханическое сканирование за счет изменения частоты, либо управляя периодом решетки. При этом эффективность преобразования энергии в волноводе в излучение составляет свыше 70% [111], [112].

Планарная антенна в режиме приема, принимая электромагнитную волну на периодической решетке, испытывает эффект дифракции, тогда, рассеянное решеткой поле, описывается, как бесконечный ряд гармоник. КПД планарной антенны при этом оценивается через выражение:

$$\eta = 1 - e^{-2aL}, \quad (4.5)$$

где L – продольные размеры конструкции антенного устройства.

Описания периодических структур, имеющих период D в соответствии с теоремой Флоке [119] возможно представить, как функцию [102]:

$$E(x, y, z, t) = E_0(x, y, z) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4.6)$$

где $E_0(x, y, z)$ – периодическая функция, описывающая электрическое поле с периодом D :

$$E_0(x, y, z + D) = E_0(x, y, z) \quad (4.7)$$

Периодическую функцию $E_0(x, y, z)$ можно разложить в ряд Фурье:

$$E_0(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_n(x, y) e^{-j \frac{2\pi n}{D} z} \quad (4.8)$$

где $e_n(x, y) = \frac{1}{D} \int_{z_0}^{z_0+D} E_0(x, y, z) e^{j \frac{2\pi n}{D} z} dz$ – амплитуда n -й пространственной гармоники, зависящая от поперечных координат.

Полное поле описывается уравнением суммы пространственных гармоник:

$$E_0(x, y, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_n(x, y) e^{-j\beta_n z} e^{j\omega t} \quad (4.9)$$

где $\beta_n = \beta + \frac{2\pi n}{D} = \frac{\varphi + 2\pi n}{D} = \frac{\varphi n}{D} = \frac{2\pi}{\Lambda_n}$ – фазовая постоянная гармоники с индексом n ;

$\beta = \varphi/D$ – фазовая постоянная гармоники с индексом $n=0$;

φ – набег фазы этой гармоники на периоде D замедляющей системы;

$\varphi_n = \beta_n D$ – набег фазы n -й пространственной гармоники на период D замедляющей системы;

Λ_n – длина волны n -й пространственной гармоники в замедляющей системе.

Все гармоники обладают одинаковой групповой скоростью равной:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{d\omega}{d\beta_n} \quad (4.10)$$

Фазовая скорость равна:

$$v_n = \frac{\omega}{\beta_n} \quad (4.11)$$

Другая важная характеристика, дисперсионная характеристика, описывается как замедление n_n в зависимости от длины волны в свободном пространстве:

$$n_n = \frac{c}{v_n} = \frac{\beta_n}{k} = \frac{\varphi n \lambda}{2\pi D} = \frac{\lambda}{\Lambda_n}, \quad (4.12)$$

где $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная волны на частоте ω ;

λ – длина волны в свободном пространстве.

Таким образом, основными характеристиками для параметрического синтеза планарных антенн выступают значения периода дифракционной решетки и длина волны. Рассмотрим варианты конструкции антенных решеток, обеспечивающих возможность частотного сканирования.

4.2 Варианты конструкции антенных устройств с однокоординатным угломестным электронным сканированием

Антенные системы, обеспечивающие однокоординатное сканирование имеют большое разнообразие конструкций элементов, формирующих излучающую решетку. Одной из наиболее простых форм антенных устройств являются офсетные антенны. Они получили широкое распространение в системах спутниковой связи. Их разрабатывают при необходимости достижения максимальной пиковой напряженности электрического поля и формирования узкой ДН [120-122]. Офсетная антенна имеет ассиметричную форму, представляющую собой часть параболоида вращения, облучатель которой располагается в его фокусе. Особенностью конструкции такой антенны является расположения облучателя, имеющее направленность в центр рефлектора антенны. На Рисунке 4.2 представлена модель офсетной сегменто-параболической антенны.

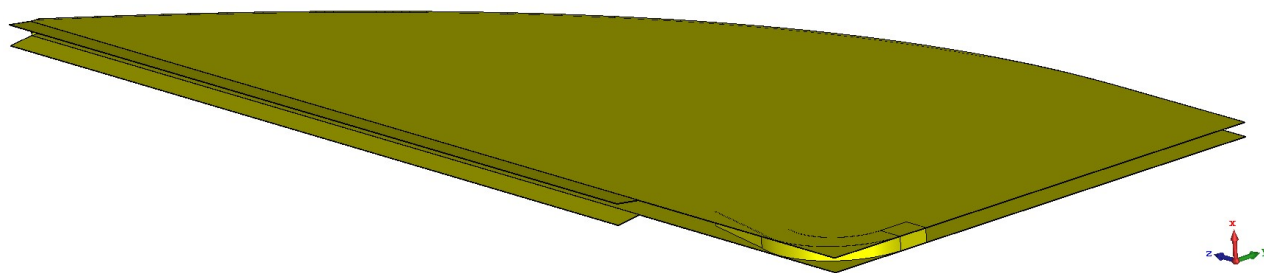
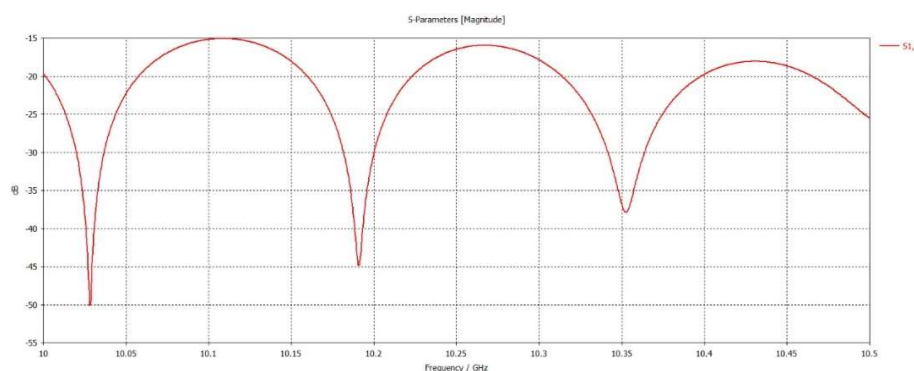
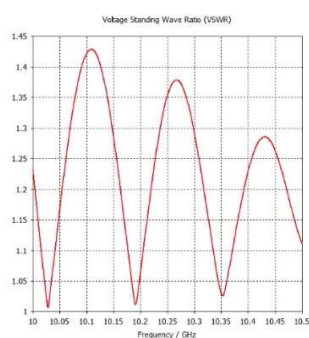


Рисунок 4.2 – Модель сегменто-параболической антенны с рупорным раскрытием

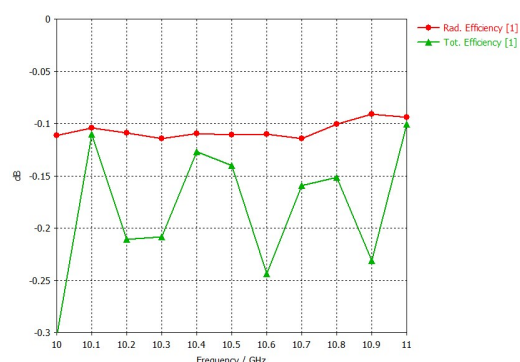
Площадь излучающей апертуры антенны составляет 600×16 мм², общие габаритны размеры составляют 853.5x382.5 мм. Питание антенного устройства представлено коаксиальным волноводом с волновым сопротивлением 50 Ом. На Рисунке 4.3 представлены результаты моделирования основных характеристик антенного устройства.



а)



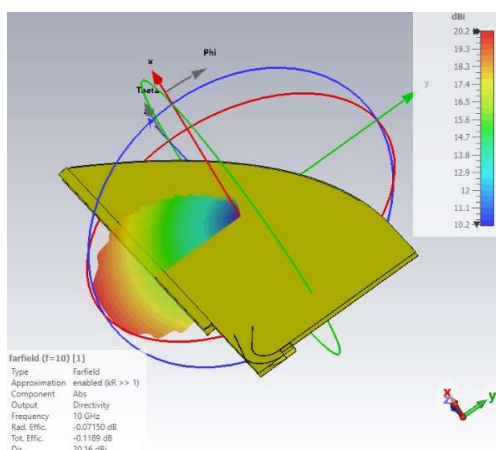
б)



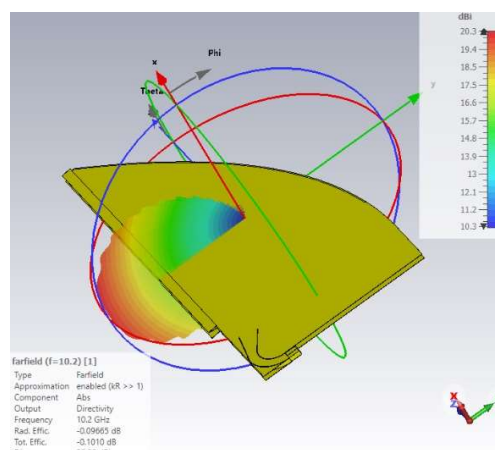
в)

Рисунок 4.3 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик сегменто-параболической антенны: а) коэффициент отражения на входе антенны; б) КСВН на входе антенны (волновое сопротивление фидерной линии - 50 Ом); в) КПД антенного устройства: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР.

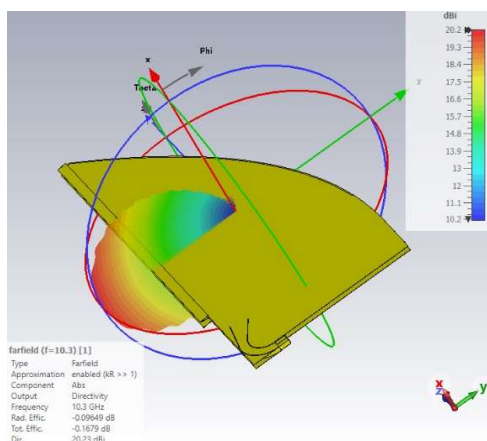
На Рисунке 4.4 представлены полученные в результате моделирования ДН сегменто-параболической антенны в диапазоне 10 ГГц – 10.5 ГГц.



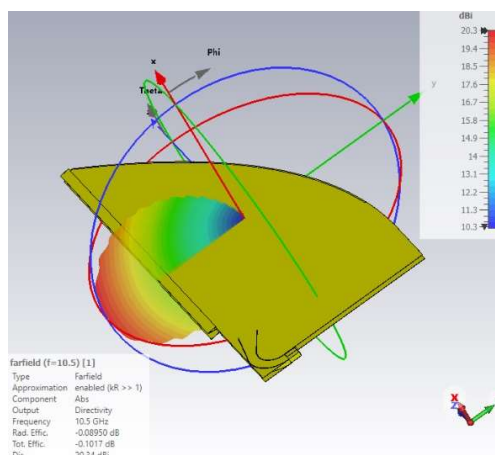
а)



б)



в)



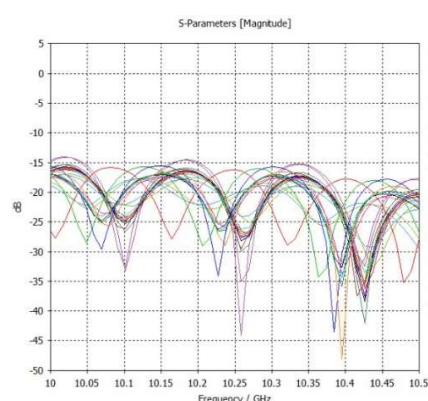
г)

Рисунок 4.4 - Объёмная диаграмма направленности единичной сегменто-параболической антенны в диапазоне частот 10 ГГц – 10.5 ГГц: а) 10 ГГц; б) 10.2 ГГц; в) 10.3 ГГц; г) 10.5 ГГц

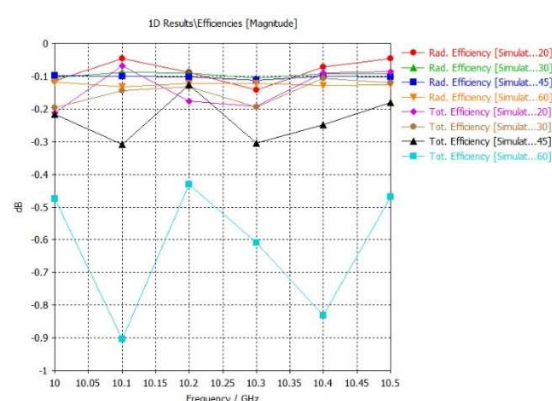
Рассчитанная модель элемента сегменто-параболической антенны позволяет сформировать ДН, сохраняющую стабильность формы и параметры в полосе рабочих частот. Коэффициент использования поверхности апертуры ФАР в рабочем диапазоне составляет от 71% до 74%. Однако, существенным недостатком предложенной антенны является сложность изготовления конструкции, связанная с поддержанием геометрии формы устройства. В целях стабильности геометрической формы устройства, становится необходимым добавление пенопластового или иного

диэлектрического заполнения внутреннего пространства антенны. Помимо этого, почти четверть длины ФАР не являются излучающей апертурой, так как представляет собой офсетные элементы, необходимые для минимизации коэффициентов отражения от входов.

Достоинством рассмотренного антенного элемента является возможность формирования на его основе антенной решетки, обеспечивающей низкую вероятность возникновения эффекта ослепления. Причиной возникновения эффекта ослепления при работе антенных решеток является возникновение объемной и поверхностной волн, имеющих отличающиеся скорости. По этой причине вместо излучения в пространство, происходит перекачивание энергии из одного элемента в другой. На Рисунке 4.5 представлены основные характеристики антенной решетки, состоящей из 24 сегменто-параболических элементов



а)



б)

Рисунок 4.5 - Основные характеристики антенной решетки, состоящей из 24 сегменто-параболических элементов в зависимости от угла сканирования: а) коэффициент отражения на входных портах антенны; б) КПД антенного устройства: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР

Разработанная модель антенной решетки, состоящей из 24 сегменто-параболических элементов, демонстрирует хороший уровень согласования

компонентов и высокую эффективность работы. Рассмотрим ДН антенного устройства в зависимости от частоты, при осуществлении электронного сканирования, результаты представлены на Рисунке 4.6.

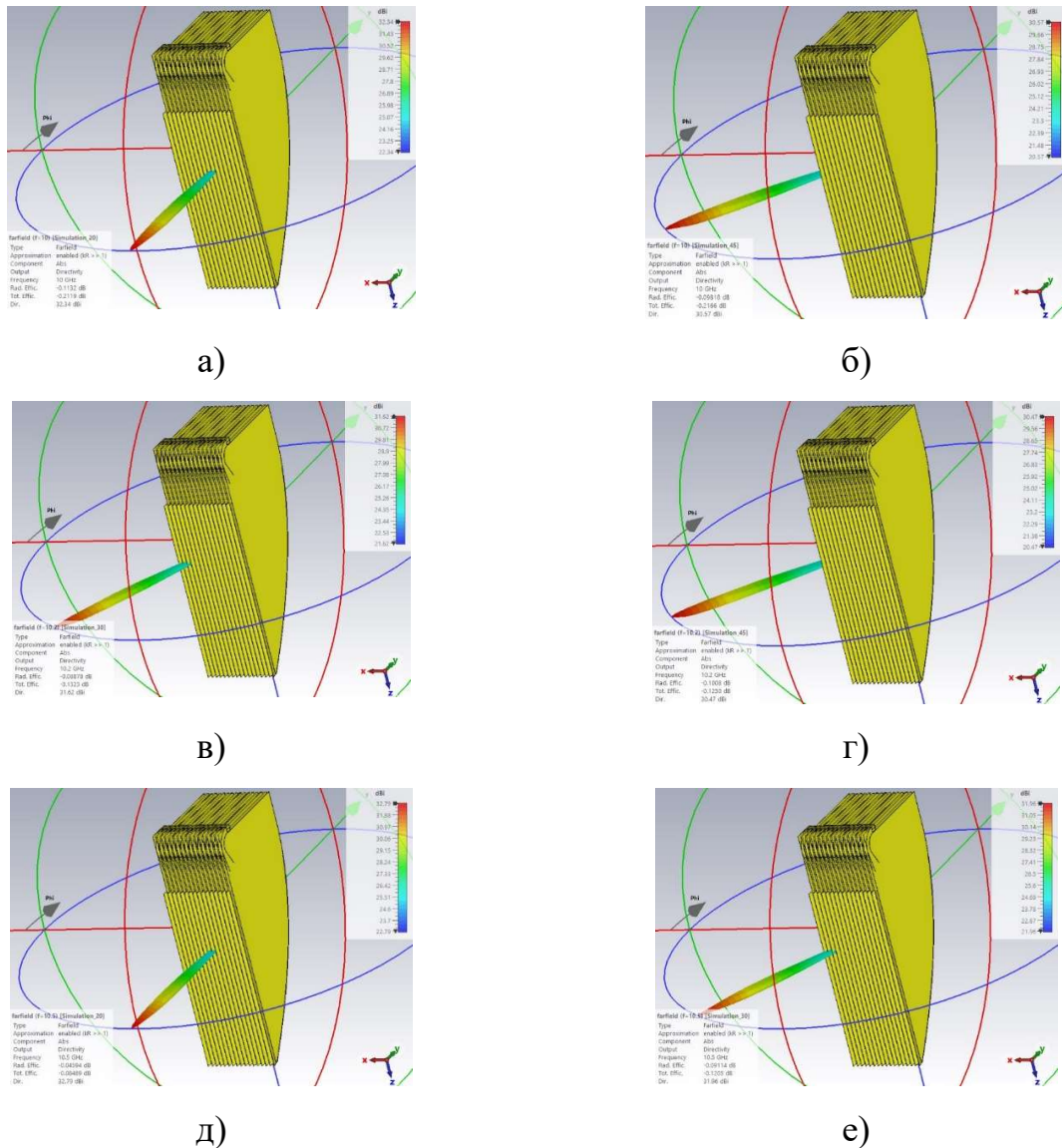


Рисунок 4.6 – Сравнение трехмерных ДН антенного устройства состоящего из 24 сегменто-параболических элементов на частоте: а) 10 ГГц, угол отклонения 20°; б) 10 ГГц, угол отклонения 45°; в) 10.2 ГГц, угол отклонения 30°; г) 10.2 ГГц, угол отклонения 45°; д) 10.5 ГГц, угол отклонения 20°; е) 10.5 ГГц, угол отклонения 30°

Несмотря на высокие характеристики, офсетная антенна имеет несколько существенных недостатков, связанных с ее формой и размерами, что ограничивает сферу ее применения. Рассмотрим вариант антенного устройства, сформированного на основе Н-плоскостного рупора. Его боковые стенки представляют собой два прямоугольных волновода со сплошными щелями во внутренних узких стенках. На Рисунке 4.7 представлена модель элемента ФАР на основе Н-плоскостного рупора и прямоугольных волноводов.

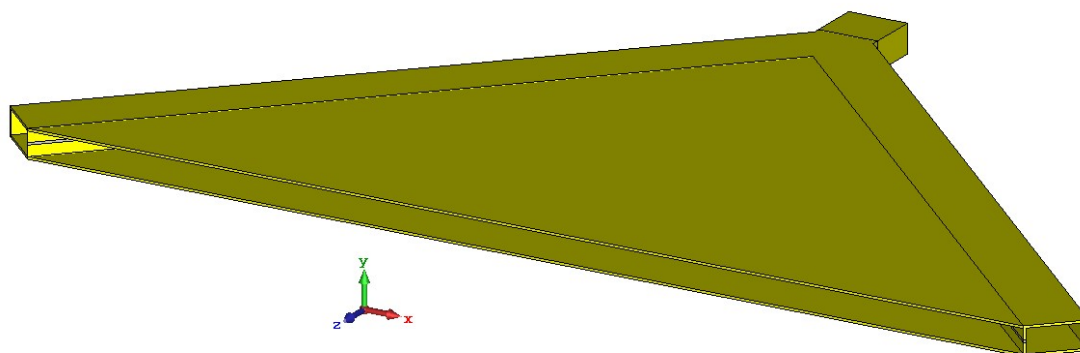


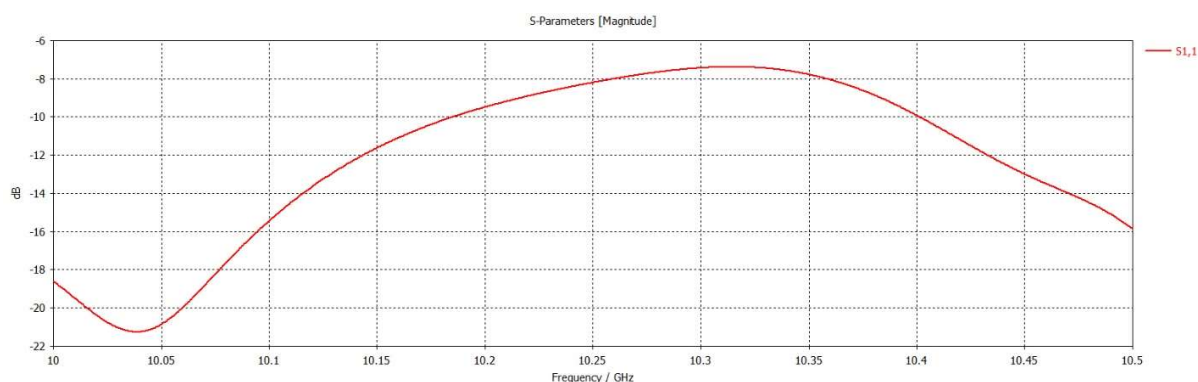
Рисунок 4.7 – Модель элемента ФАР, состоящего из Н-плоскостного рупора и прямоугольных волноводов, образующих его узкие стенки

Прямоугольные волноводы, формирующие узкие стенки волновода, имеют размеры канала 12x25 мм. Общие габаритные размеры элемента антенны составляют 458.2x259.5 мм. Входное сопротивление порта составляет 50 Ом. На Рисунке 4.8 представлена модель входного порта в разрезе.

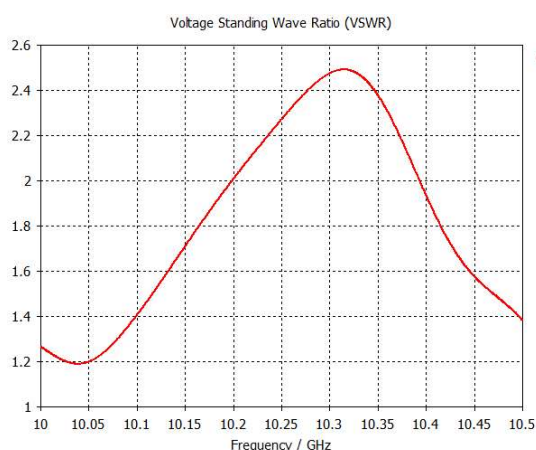


Рисунок 4.8 – Входной порт элемента ФАР, на основе Н-плоскостного рупора

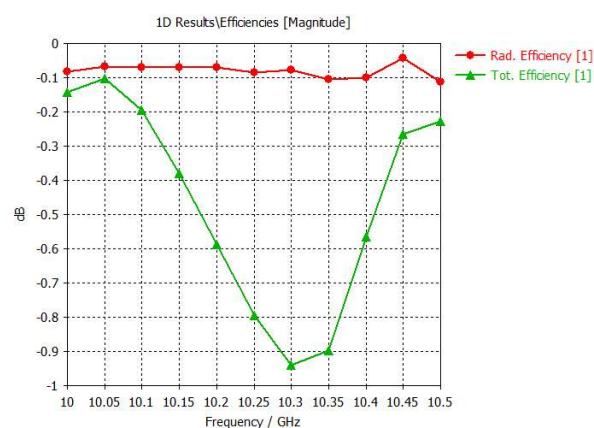
Питание антенного элемента осуществляется с помощью коаксиально-волноводных переходов, реализованных на основе антенн Вивальди и шунтовой запитки. Для оценки работоспособности устройства был проведен расчет основных характеристик упрощенной модели антенны, результаты представлены на Рисунках 4.9 – 4.10.



а)

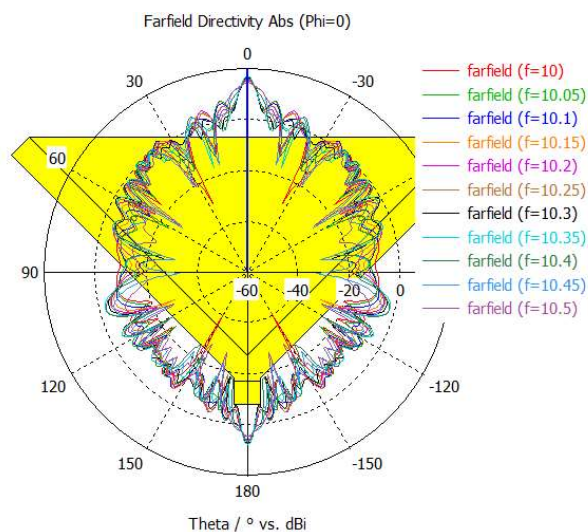


б)

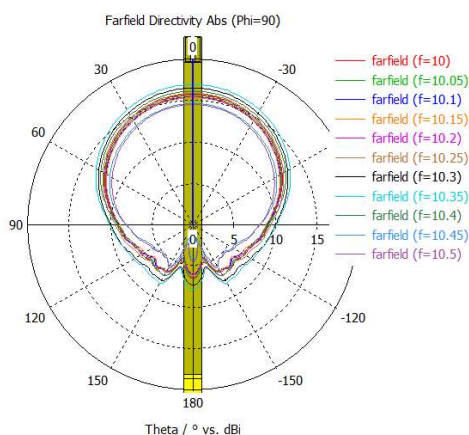


в)

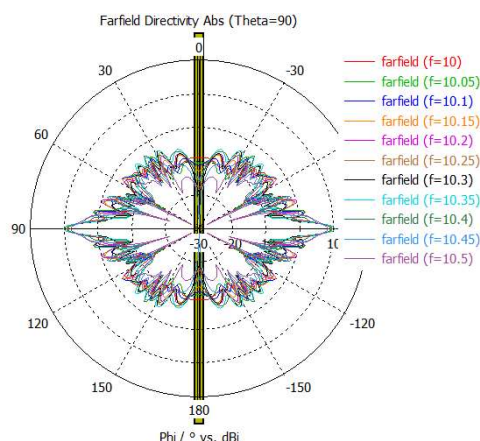
Рисунок 4.9 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик элемента ФАР, на основе Н- плоскостного рупора: а) коэффициент отражения на входе антенны; б) КСВН на входе антенны (волновое сопротивление фидерной линии - 50 Ом); в) КПД антенного устройства: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР



а)



б)



в)

Рисунок 4.10 – Диаграммы направленности элемента ФАР, на основе Н-плоскостного рупора, в полосе частот от 10 до 10.5 ГГц в плоскостях:

а) $\Phi = 0^\circ$; б) $\Phi = 90^\circ$; в) $\Theta = 90^\circ$

Элемента ФАР, на основе Н-плоскостного рупора демонстрирует высокие характеристики излучения, и сохраняет стабильную форму ДН во всей полосе рабочих частот. На основе единичного Н-плоскостного рупора возможно построить антенную решетку для широкоугольного сканирования. На Рисунке 4.11 представлена модель ФАР, состоящая из 24 Н-плоскостных рупоров, построенных на основе прямоугольных волноводов стандартного сечения.

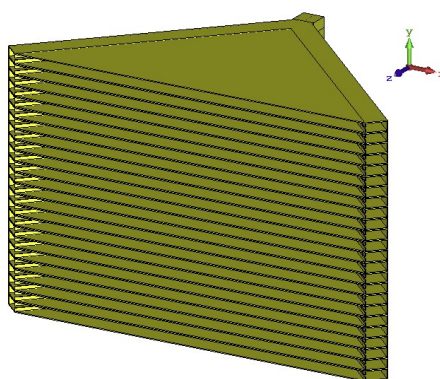


Рисунок 4.11 - Модель ФАР, состоящая из 24 Н- плоскостных рупорных элементов, построенных на основе прямоугольных волноводов

Конструкция ФАР представляет собой массив из соединенных друг с другом широкой стороной плоскостных рупорных элементов, ее габаритные размеры составляют 288x459.5x258 мм. Для достижения наилучших рабочих характеристик устройства, антенные элементы должны не оказывать взаимное влияния. На Рисунке 4.12 представлены полученные в результате моделирования основные характеристики ФАР.

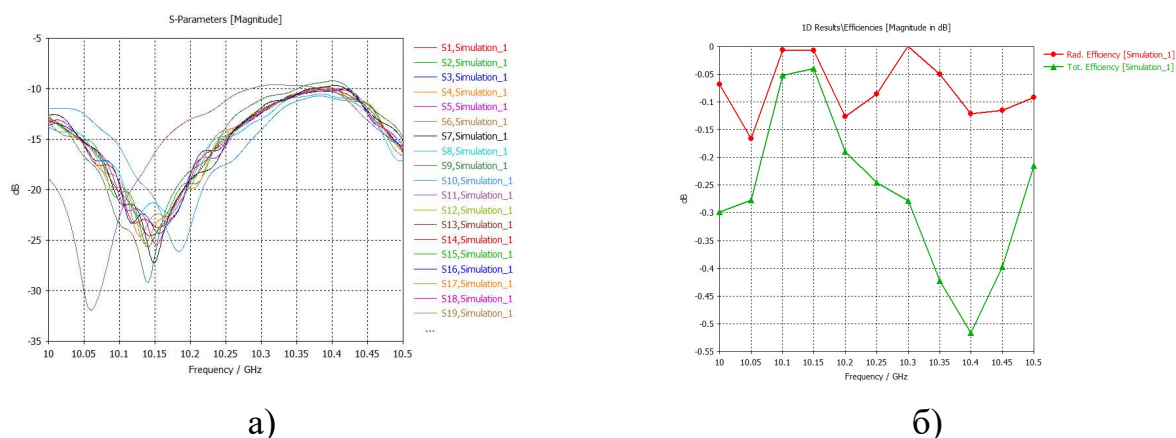


Рисунок 4.12 – Результаты электродинамического моделирования ФАР на основе Н- плоскостных рупоров: а) коэффициент отражения на входах рупоров формирующих ФАР; б) КПД антенного устройства: линия с кружками – потери в материалах; линия с треугольниками – суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР

Так как АР обладает симметричной геометрией, то характеристики работы первых 12 портов будут сходными с характеристиками портов, симметрично расположенным, с другой стороны. Рассмотрим форму ДН при синфазной работе элементов ФАР, результаты моделирования представлены на Рисунке 4.13.

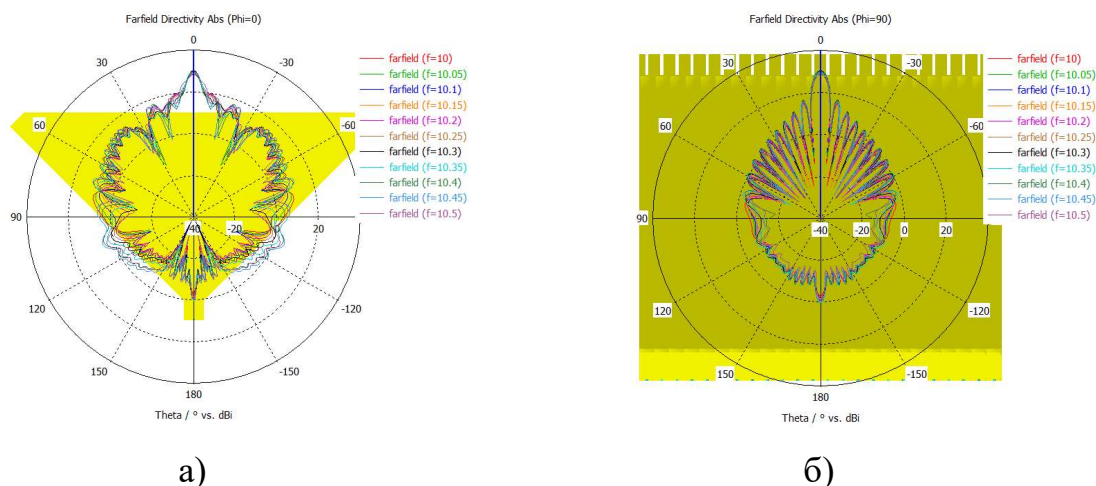
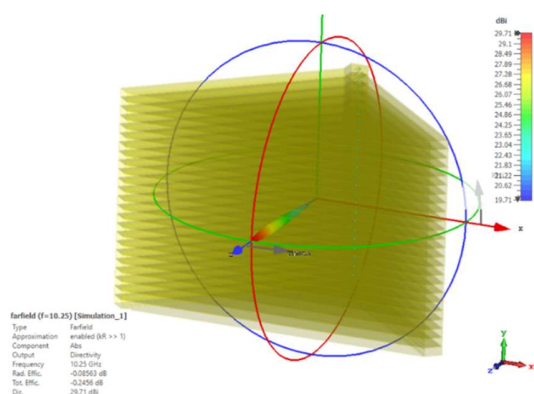
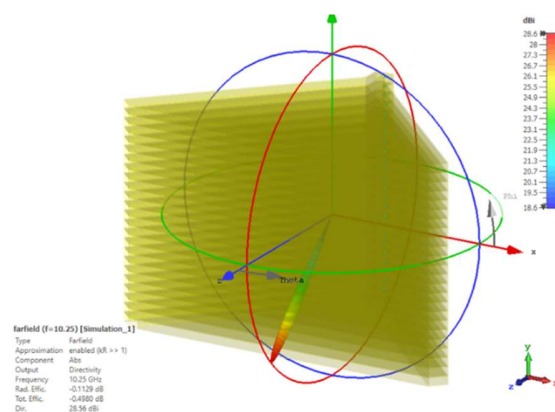


Рисунок 4.13 – Сравнение ДН ФАР на основе Н- плоскостных рупоров в полосе частот от 10 до 10.5 ГГц: а) форма двумерных ДН в плоскости $\Phi=0^\circ$; б) форма двумерных ДН в плоскости $\Phi=90^\circ$

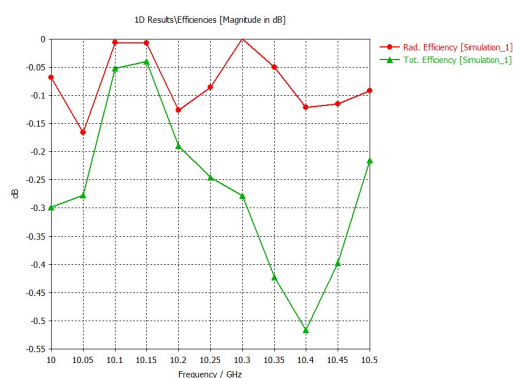
Благодаря согласованности элементов структуры антенной решетки, возможно обеспечить отклонение главного лепестка ДН в секторе $\pm 40^\circ$ без возникновения эффекта ослепления. На Рисунке 4.14 представлены ДН и КПД антенной решетки, полученные в результате моделирования при излучении в направлении перпендикулярном апертуре и при отклонении главного луча ДН на 40° относительно нормали.



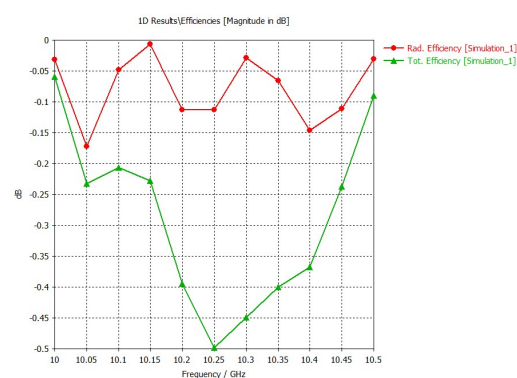
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.14 – Сравнение характеристик ФАР на основе Н- плоскостных рупоров: а) трехмерная ДН на частоте 10.25 ГГц при излучении по нормали к ее апертуре; б) трехмерная ДН на частоте 10.25 ГГц, угол отклонения главного лепестка ДН составляет 40° относительно нормали; в) КПД антенного устройства при излучении по нормали к ее апертуре; г) КПД антенного устройства, угол отклонения главного лепестка ДН составляет 40° относительно нормали

Предлагаемая ФАР демонстрирует возможность формирования игловидной ДН с шириной главного луча около 5° по уровню -3 дБ. Сформированная на основе Н-плоскостных рупоров ФАР, демонстрирует высокий уровень рабочих характеристик, однако имеет сложности в реализации структуры, связанные с конструктивными особенностями такими, как малая толщина стенок рупоров.

В качестве варианта возбуждения планарного волновода могут использоваться линейные АР из парных металлических лент, возбуждаемых с помощью желобковых волноводов. Для осуществления однокоординатного сканирования, предлагается конструкция АР на основе рядов прямоугольных желобковых волноводов. Ряды волноводов расположены в одной плоскости и имеют соединения друг с другом, представляющие собой трехдецибелльные синфазные (Н- плоскостные) делители мощности. Их конструкция основана на прямоугольных волноводах, заполненных полистиролом и запитываемых от коаксиальных волноводов с помощью переходников на основе антенн Вивальди с шунтовой запиткой. На Рисунке 4.15 представлена модель рассматриваемой антенной решетки.

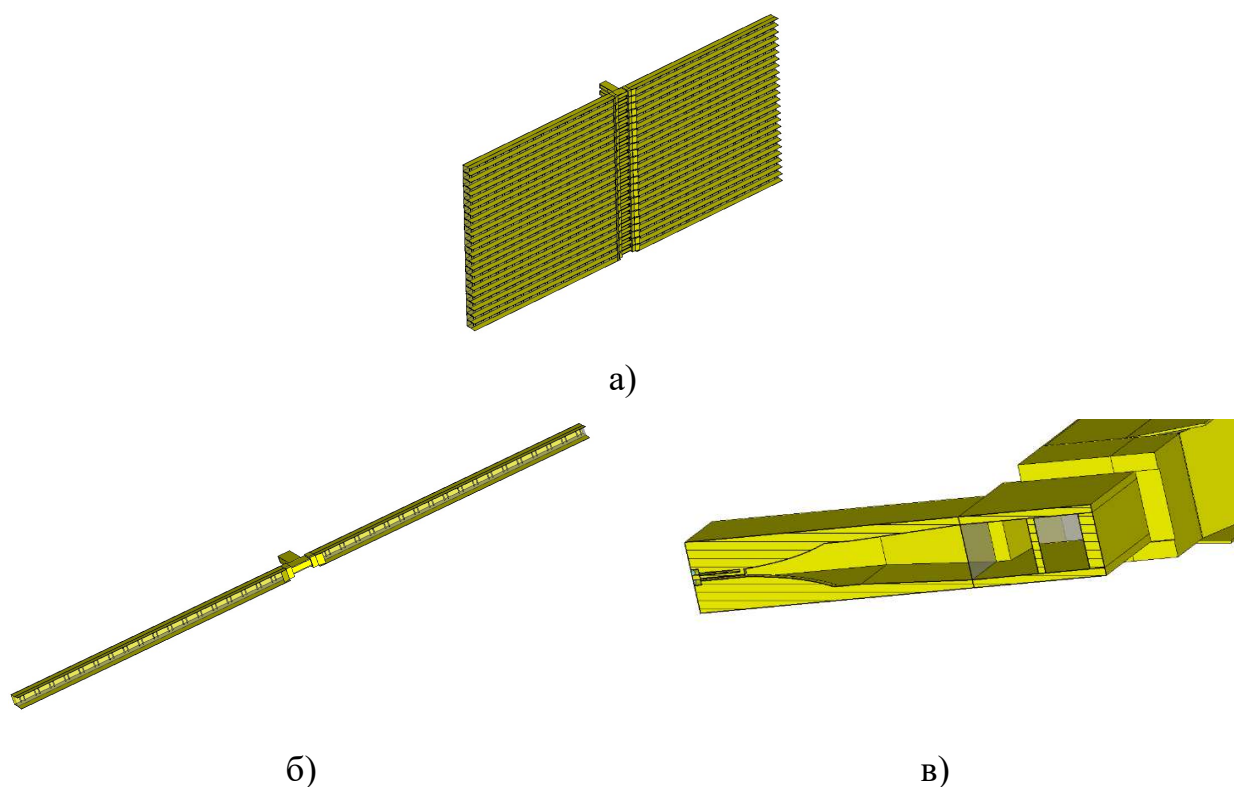


Рисунок 4.15 – Электродинамическая модель ФАР, на основе Н- плоскостных желобковых парных волноводов: а) общий вид антенной решетки, состоящей из 24 желобковых волноводов; б) модель единичного волновода на основе диэлектрического материала; в) вид входного порта ФАР в разрезе

Желобковые волноводы, формирующие ФАР, имеют основу в виде диэлектрических стержней из полистирола с сечением 12.1x12.7 мм. Желобковые волноводы образуют два ряда рупорных раскрытов в Е- плоскости. В целях минимизации отражения от излучающих элементов, на поверхность диэлектрика нанесены парные металлические ленты. Расстояние между соседними лентами в парах составляет четверть от длины волны на центральной частоте 10.25 ГГц (0.75 см). Конструкция ФАР имеет габаритные размеры составляющие 776x360x62 мм. На Рисунке 4.16 представлены полученные в результате моделирования основные характеристики ФАР.

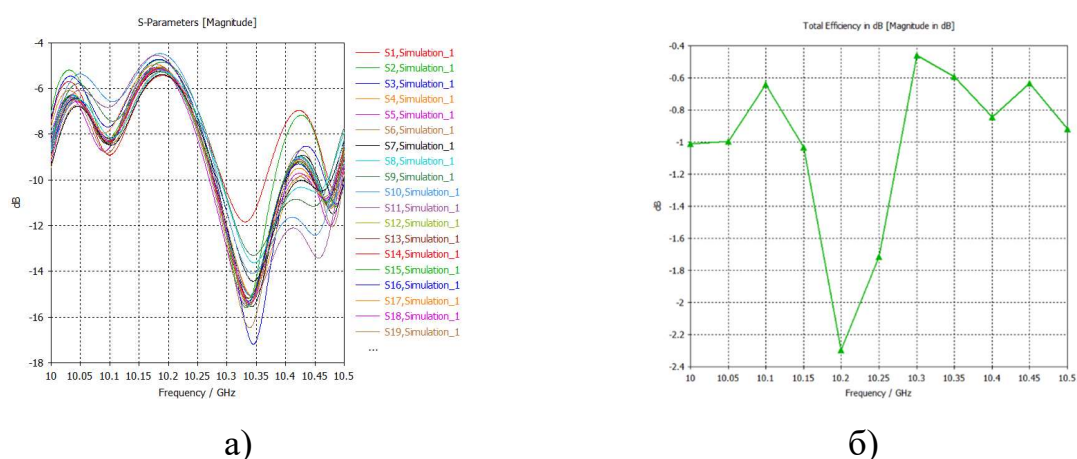


Рисунок 4.16 – Результаты электродинамического моделирования основных характеристик ФАР на основе Н- плоскостных желобковых парных волноводов: а) коэффициент отражения на входе антенны; б) суммарные потери, с учетом рассогласования и взаимной связи элементов ФАР

Из-за близкого расположения элементов ФАР, они оказывают взаимное влияние друг на друга, снижающее общие характеристики антенного устройства. В качестве диаграммообразующей системы ФАР может выступать линза Ротмана и СВЧ-коммутатор 1:24, либо конструкция на основе делителя мощности 1:24 и 24 фазовращателей. Полученные в результате моделирования ДН устройства, при

осуществлении синфазного сканирования, и при отклонении главного лепестка ДН на 45° , представлены на Рисунке 4.17.

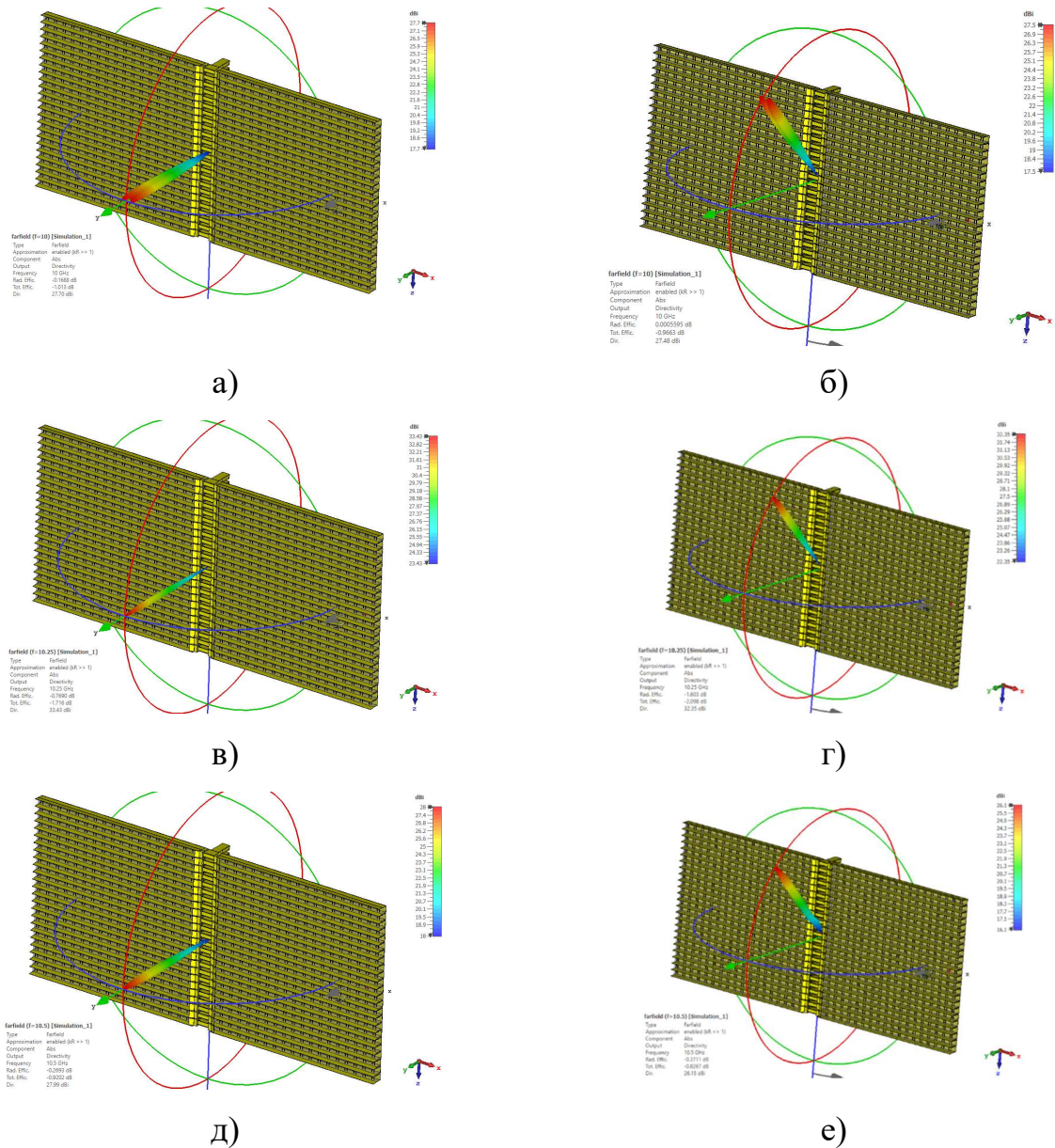


Рисунок 4.17 – Сравнение трехмерных ДН ФАР на основе Н- плоскостных желобковых парных волноводов на частоте: а) 10 ГГц при излучении по нормали; б) 10 ГГц, угол отклонения 45° ; в) 10.25 ГГц при излучении по нормали; г) 10.25 ГГц, угол отклонения 45° ; д) 10.5 ГГц при излучении по нормали; е) 10.5 ГГц, угол отклонения 45°

Основным отличием ФАР на основе линейных подрешеток, реализованных на базе желобковых волноводов и парных ленточных излучателей, является излучение по нормали к апертуре ФАР при синфазном возбуждении ее подрешеток, это качество продемонстрировано на Рисунке 4.17.

Преимуществом представленного варианта конструкции ФАР, состоящего из желобковых волноводов, является ее конструкция, не требующая сложных компонентов и высокотехнологичного производства. Помимо этого, высота устройства около 62 мм и отсутствие выступающих частей, позволяют при необходимости, сформировать обтекаемую форму. Недостатком варианта ФАР на основе линейных подрешеток, реализованных на базе желобковых волноводов и парных ленточных излучателей, является возрастание коэффициента отражения от их входов при излучении строго по нормали, и потери мощности, составляющие до $2\div 2.5$ дБ.

Для управления рассматриваемой ФАР необходимо включение в состав конструкции устройства Фарадеевских фазовращателей, реализованных в полосковом варианте. Фазовращатель является устройством, обеспечивающим изменение параметров электрического сигнала, таких как амплитуда и частота. Помимо этого, с их помощью возможно осуществлять управление фазой сигнала, в целях выполнения модуляции и коррекции фазовых и временных искажений [123].

Волноводные ферритовые Фарадеевские фазовращатели являются распространенным техническим решением в отечественных антенных системах [124], [125]. Однако, особенности конструкции и технологии, используемые в данных фазовращателях, увеличивают потребляемую энергию необходимую для перемагничивания ферритового стержня, расположенного в центральной части фазовращателя, а также снижает скорость быстрогодействия устройства. Одним из вариантов решения данной проблемы является конструирование ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности [126]. Данный вариант фазовращателя обеспечивает максимально высокое быстродействие, однако его

особенности ограничивают возможность сканирования в секторе около $\pm 45^\circ$. При разработке конструкции фазовращателя необходимо учитывать погрешности при изготовлении элемента, а также возможность возникновения клеевых и воздушных зазоров [124]. Помимо этого, важными требованиями к современным фазовращателям является обеспечение низкого уровня потерь, малые габаритные размеры и низкая стоимость серийного производства [127].

Для ФАР на основе желобковых волноводов была разработана конструкция полоскового Фарадеевского фазовращателя, его трехмерная модель представлена на Рисунке 4.18.

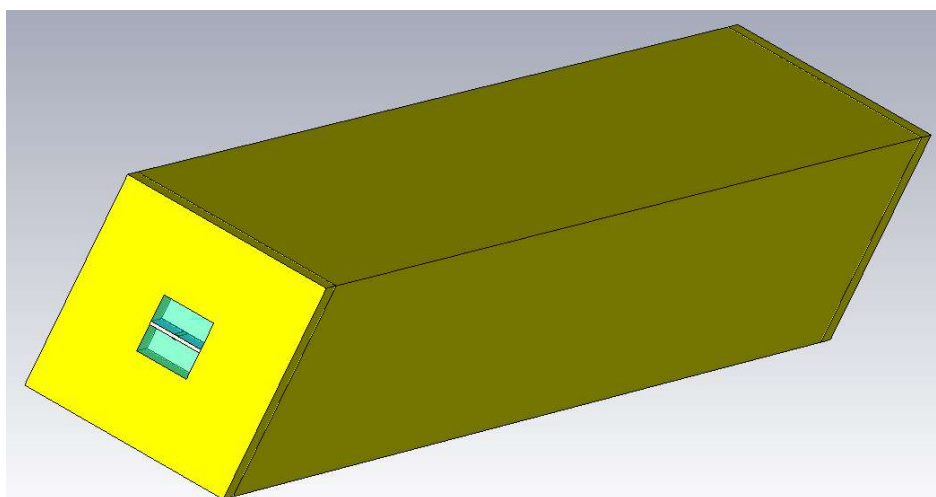
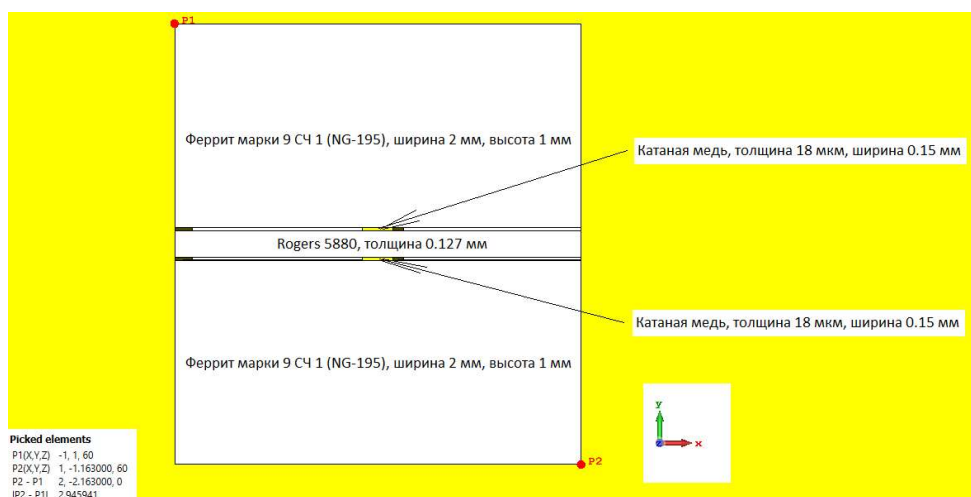
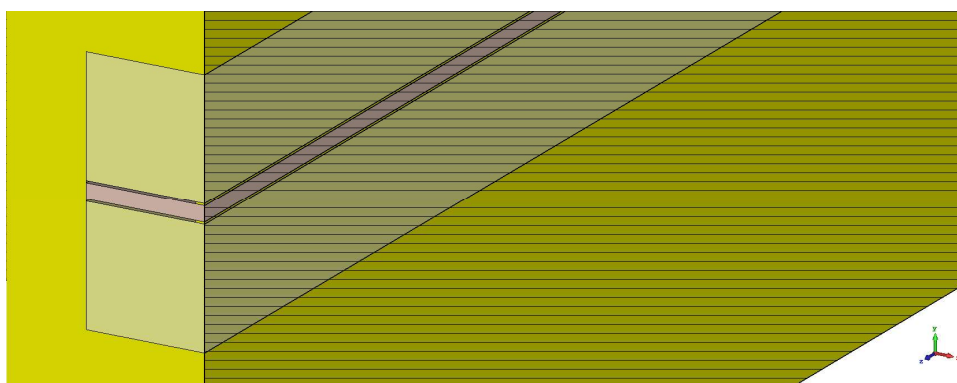


Рисунок 4.18 – Модель полоскового фарадеевского фазовращателя

Габаритные размеры полоскового фазовращателя составляют 8х8.15х60 мм. Структуру волновода возможно разделить на две основные части. Внешняя часть представляет собой оболочку из меди, бронзы или алюминиевого сплава, состоящую из двух частей. Ее возможно изготовить методом фрезерования с последующей шлифовкой и полировкой внутренней поверхности, при условии достижения необходимой чистоты поверхности на уровне катаной меди. Фазовращатель, расположенный внутри соленоида, имеет равномерное распределение витков по всей длине. Максимальная величина управляющего магнитного поля – 1300 Эрстед. На Рисунке 4.19 представлено изображение поперечного сечения фазовращателя.



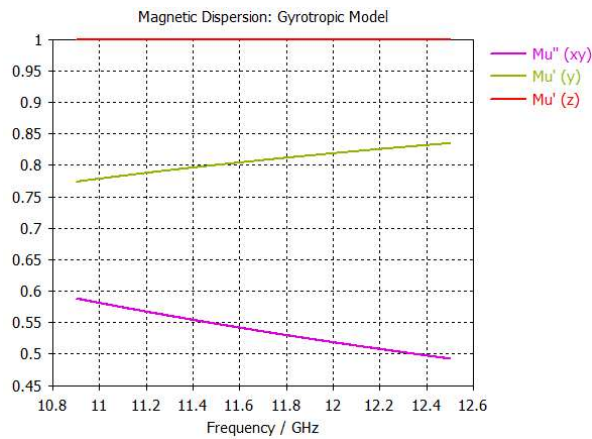
а)



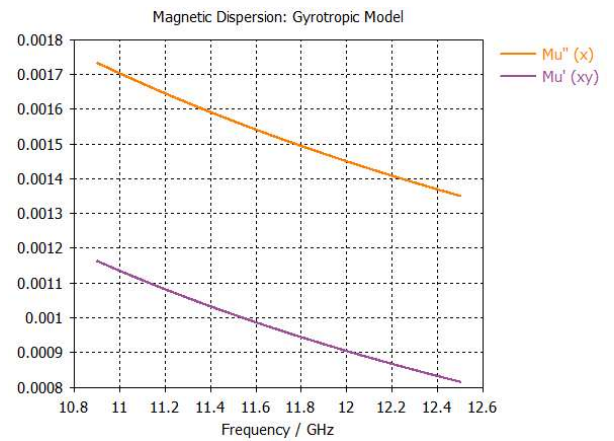
б)

Рисунок 4.19 – Внешний вид сечения фазовращателя: а) вид с поперечным сечением и указанными габаритными размерами; б) вид с продольным сечением в вертикальной плоскости

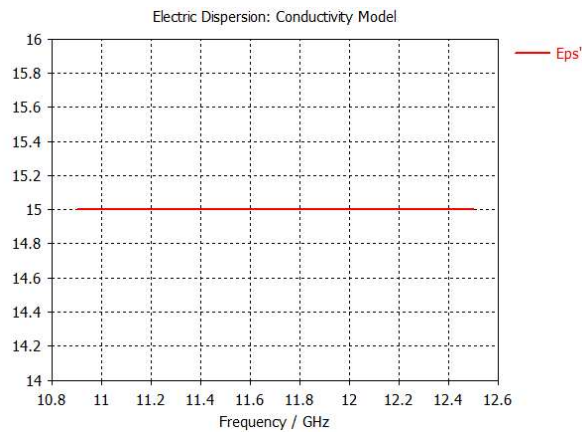
Длина экранированного с боков «сэндвича» составляет 60 мм. Его структура представляет собой плату, на основе материала Rogers 5880, имеющую двухстороннюю металлизацию. Толщина центрального слоя составляет 0.127 мм, с обеих сторон нанесены слои катаной меди, имеющие толщину 0.018 мм. В процессе моделирования рассматривались основные характеристики фазовращателя в диапазоне частот от 10.9 ГГц до 12.5 ГГц. На Рисунке 4.20 представлены результаты расчета диэлектрической и магнитной проницаемости феррита.



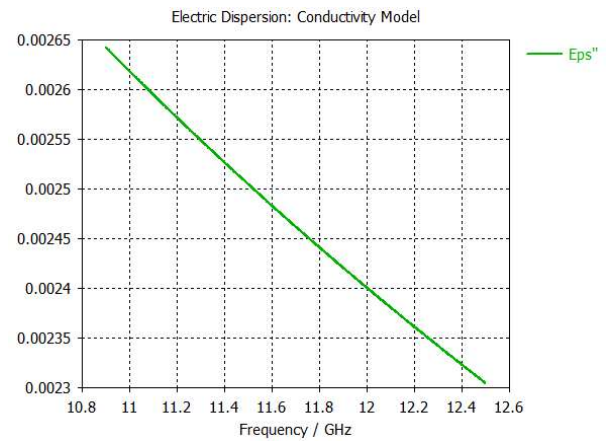
а)



б)



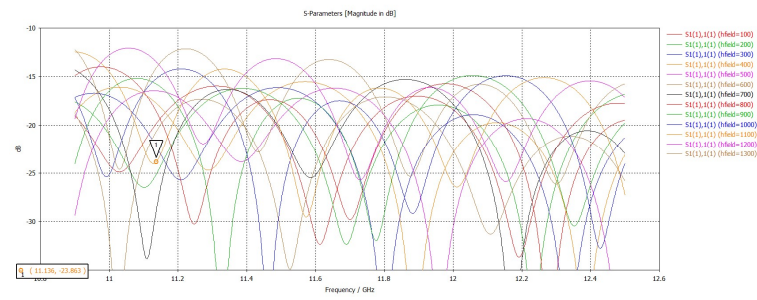
в)



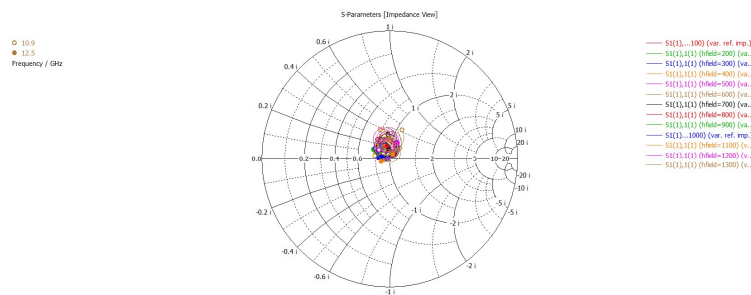
г)

Рисунок 4.20 – Результаты моделирования: а), б) компоненты магнитной проницаемости феррита; в), г) компоненты диэлектрической проницаемости феррита

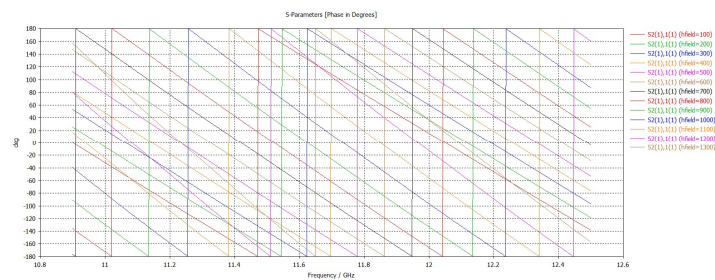
На Рисунке 4.21 представлены основные характеристики фазовращателя в зависимости от напряженности магнитного поля.



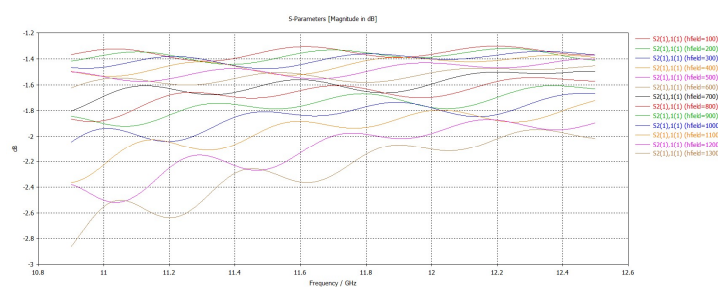
а)



б)



в)



г)

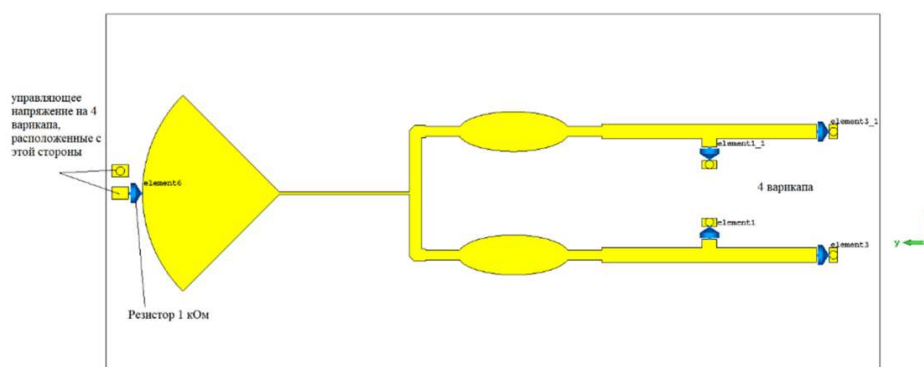
Рисунок 4.21 – Основные характеристики фазовращателя в зависимости от напряженности магнитного поля от 100 до 1300 Эрстед: а) коэффициенты отражения от входа фазовращателя; б) номограмма Смита; в) сдвиг фазы между входом и выходом; г) зависимость потерь от частоты

Достоинством данного фазовращателя является существенно меньшие поперечные размеры в сравнении с волноводными фазовращателями Реджиа-Спенсера. Недостатком рассматриваемого элемента является сложность изготовления, требующая высокой точности обработки ферритовых пластин, использование катушек подмагничивания и необходимость постоянного пропускания через них тока. Помимо этого, при использовании большого числа подобных фазовращателей в составе структуры двухкоординатных ФАР, потребуется стабилизация их температуры, связанная с тепловым рассеянием мощности.

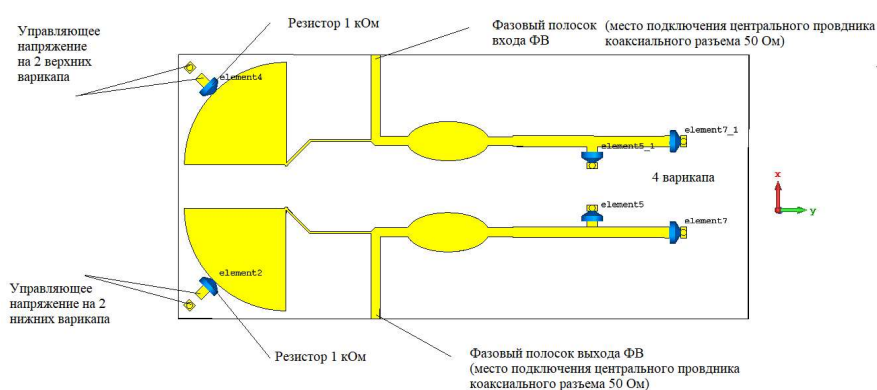
Актуальным вариантом построения конструкции современных фазовращателей является применение микроэлектромеханических систем (МЭМС) и варикапов. Данный вариант построения конструкции позволяет получить миниатюрные размеры устройства при обеспечении высокой энергоэффективности. Недостатком фазовращателя на основе варикапов является узкая полоса частот [79].

Перспективным направлением при разработке фазовращателей является применение технологии SIW (Substrate Integrated Waveguide) – интегрированный в подложку волновод. Данный подход не требует высоких затрат для изготовления компонента, при этом проектируемая конструкция фазовращателя сочетает небольшие габаритные размеры и малый вес.

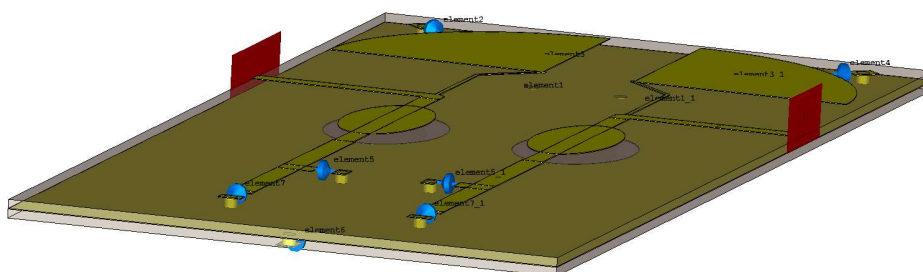
Вариантом более технологичного фазовращателя является конструкция на основе связанных линий, нагруженных варикапами. Такая схема использует р-п переходы для изменения емкости, что оказывает влияние на фазу сигнала. Модель фазовращателя на основе связанных линий и 4 пар варикапов представлена на Рисунке 4.22.



а)



б)



в)

Рисунок 4.22 – Модель фазовращателя на основе связанных линий, реализованных на трехслойной печатной плате: а) схематичный вид платы сверху; б) схематичный вид платы снизу; в) вид антенны с боку

Структура фазовращателя имеет основу в виде трехслойной печатной платы (3 слоя металла и 2 слоя диэлектрика) и 8 варикапов SMV2019-040LF в корпусе SOD-882. Конструкция модели устройства представляет вариант реализации на основе

китайского аналога СВЧ ламината Rogers 4003С с толщиной двух слоев равной 0.203 мм каждый и металлизацией составляющей 18 мкм.

Полученные в результате электродинамического моделирования основные характеристики фазовращателя представлены на Рисунке 4.23.

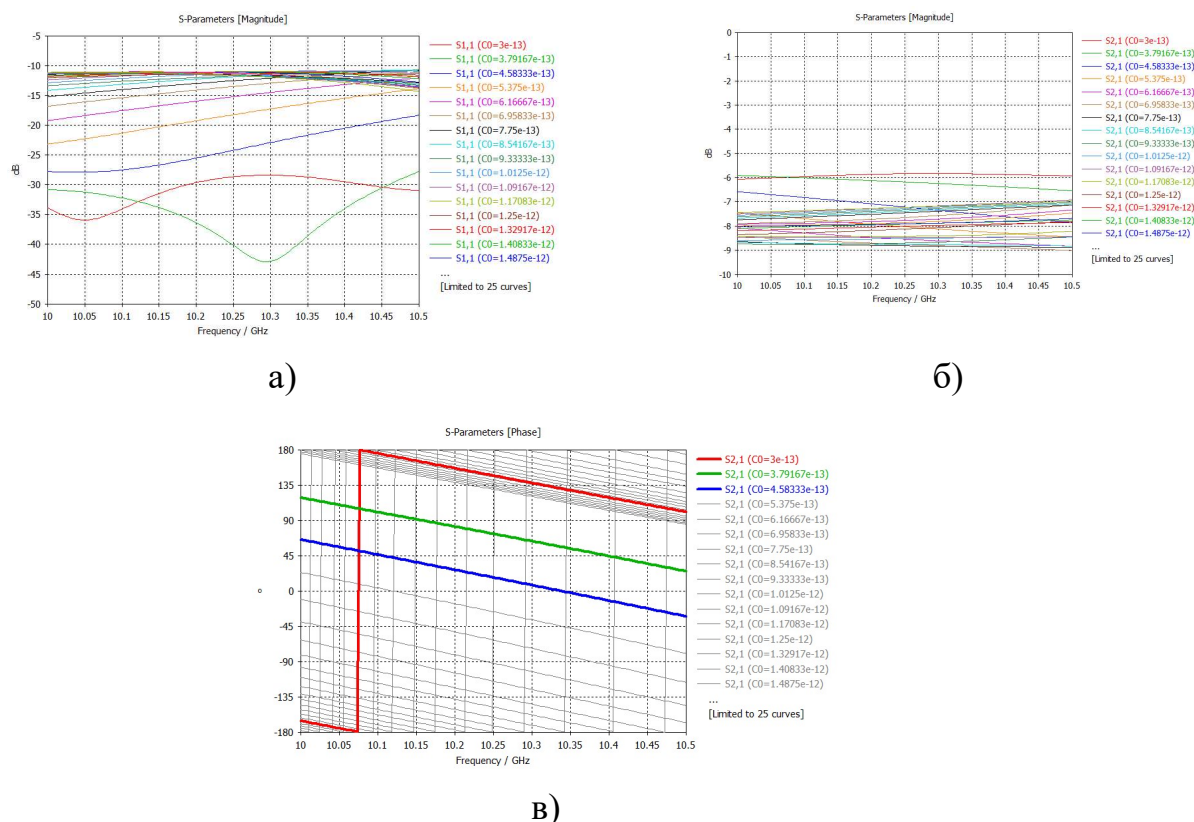


Рисунок 4.23 – Результаты моделирования основных характеристик фазовращателя при различных значениях управляющих напряжений, подаваемых на варикапы: а) коэффициенты отражения; б) потери мощности; в) сдвиги фаз в фазовращателе

Фазовращатель позволяет осуществлять регулировку фазы в диапазоне рабочих частот за счет изменения емкости варикапов от 0.3 пФ до 2.2 пФ. Рассмотрим вариант конструкции диаграммообразующей системы, представляющей собой синфазный и равноамплитудный делитель мощности. Его конструкция сформирована на основе радиального волновода, имеющего один входной порт и двадцать четыре выходных

порта. Корпус элемента имеет диаметр 137.5 мм и толщину 12 мм. На Рисунке 4.24 представлена модель делителя мощности для электродинамического моделирования.

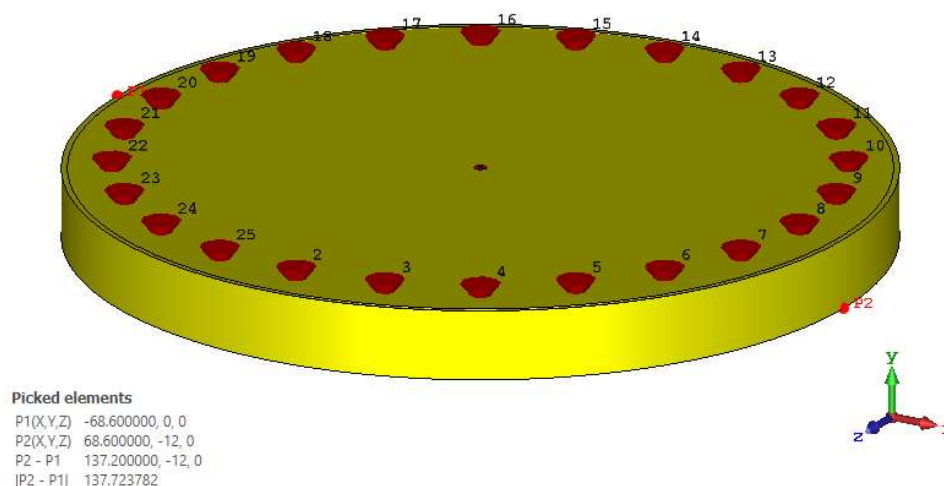


Рисунок 4.24 - Синфазный и равноамплитудный делитель мощности 1:24 на основе радиального волновода

Порты делителя мощности представляют собой коаксиальные волноводы с заполнением канала материалом диэлектриком, тефлоном, имеющие волновое сопротивление 50 Ом. На Рисунке 4.25 представлены основные характеристики делителя мощности.

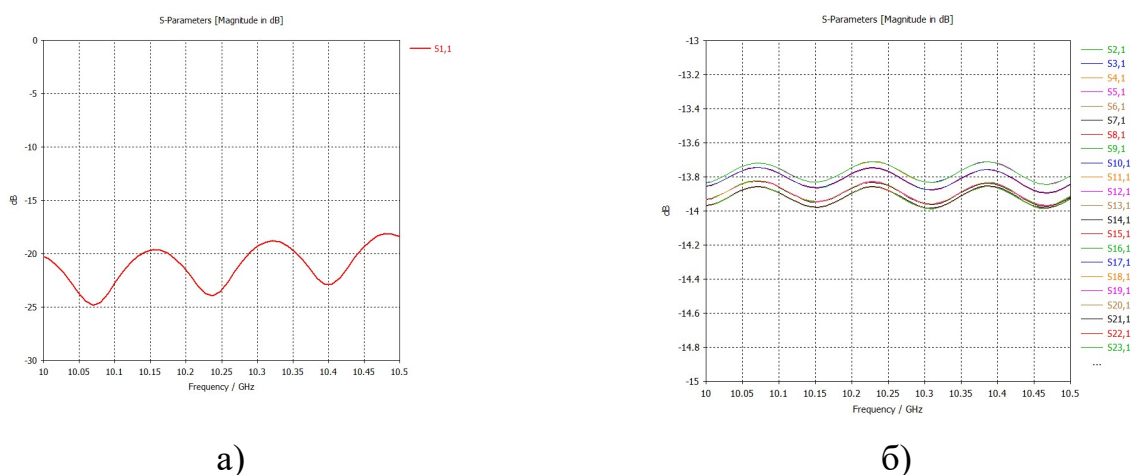


Рисунок 4.25 – S–параметр делителя мощности в полосе частот от 10 до 10.5 ГГц:

а) коэффициент отражения от входа; б) коэффициент передачи между входом и выходами устройства

4.3 Планарная антенна на основе диэлектрического волновода с механическим широкоугольным сканированием и управляемой ДН

Планарные антенны имеют широкое распространение, благодаря высоким характеристиками при относительной простоте производства, в сравнении с прочими видами ФАР. В совокупности качеств планарных антенн, появляется возможность для проведения модификации конструкции устройств с целью улучшения конкретных характеристик, либо получения новых технических возможностей. Осуществление управления направлением главного луча, либо изменение формы ДН может быть перспективной сферой изучения планарных антенн. Управление ДН планарной антенны возможно обеспечить с помощью механического сканирования осуществляемого за счет изменения геометрии дифракционной решетки, расположенной на поверхности волновода [128].

Антенные системы, поддерживающие электрическое сканирование, обычно представляют собой конструкции, имеющие в своем составе большое число фазовращателей и других элементов. ФАР демонстрируют высокие характеристики излучения в рабочем режиме, например, скорость сканирования пространства и высокое значение коэффициента усиления, однако имеют существенный недостаток в виде высоких тепловых потерь. Совокупность преимуществ и недостатков ФАР делает их применение ограниченным, однако в сфере военных технологий, когда характеристики играют ключевую роль, подобные недостатки имеет небольшое значение.

Планарная антенна на основе диэлектрического волновода с механическим сканированием может выступать в качестве более дешевой альтернативы ФАР. Плоский диэлектрический волновод, является основой планарной антенны. Конструкция устройства представляет собой пластину из неоднородного диэлектрического материала, широкая сторона которого, соединяется с соразмерным металлическим листом. В качестве диэлектрического материала выбран полиэтилен. К

узкой стороне волновода примыкает облучающий рупор. На поверхности материала диэлектрика располагается периодическая решетка, выполненная из одинаковых металлических лент период которых изменяется в диапазоне от 11 до 22 мм [128], [129]. На Рисунке 4.26 представлена модель планарной антенны с установленным рядом периодических пластин.

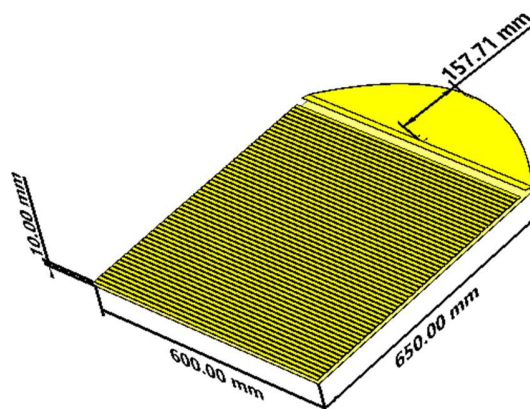


Рисунок 4.26 – Внешний вид модели планарной антенны с регулируемой периодической решеткой

Периодическая решетка представляет собой ряд соединенных между собой плоских металлических лент. Ленты в совокупности образуют дифракционную решетку. Вариант механизма, обеспечивающего равномерное распределение лент на поверхности диэлектрического материала, а также обеспечивающий возможность изменения их периода представлен на Рисунке 4.27.

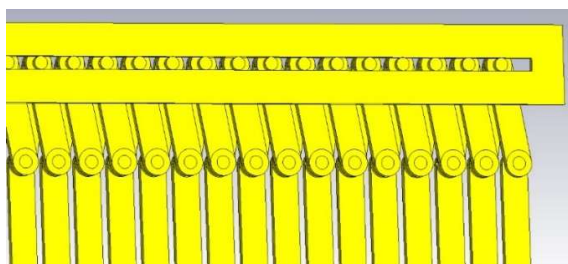
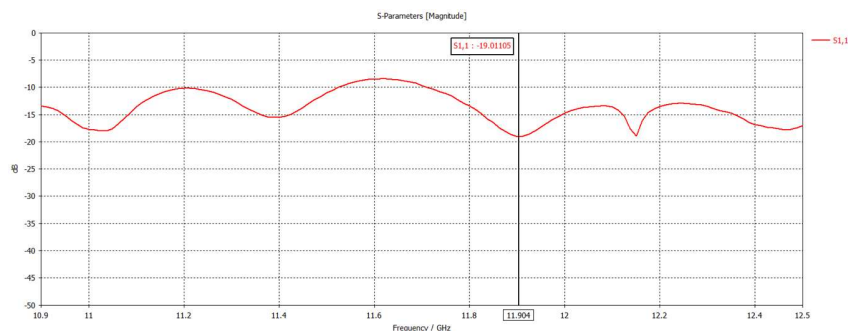


Рисунок 4.27 – Вариант механизма, соединяющего металлические ленты друг с другом, обеспечивающий синхронное изменение периода дифракционной решетки

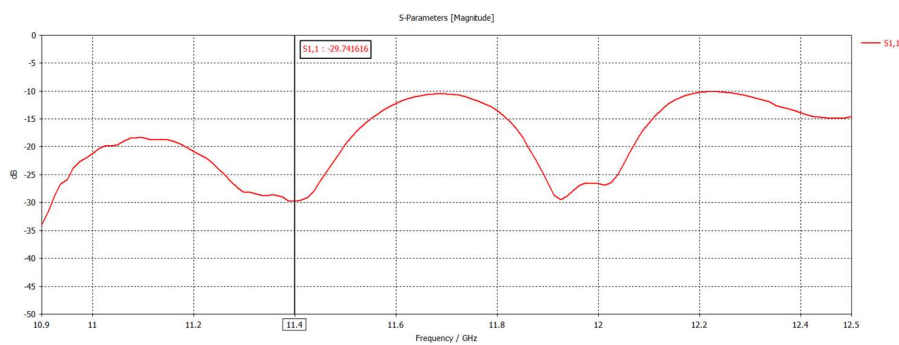
Плоская форма конструкции обеспечивает низкое аэродинамическое сопротивление устройства, что, вместе с небольшой массой и габаритами, позволяет использовать антенну как часть стационарных систем, так и комплексов мобильного размещения.

Спутниковые системы связи, устанавливаемые на мобильных объектах, действуют в Ку- 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, они представлены на Рисунке 4.28.



а)

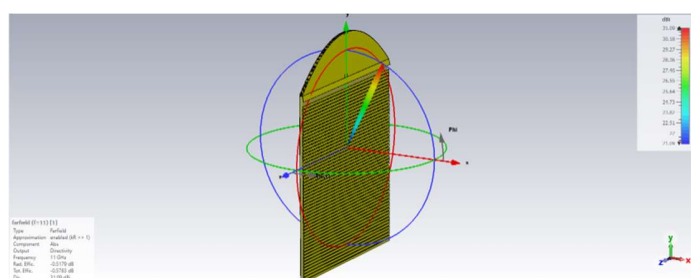


б)

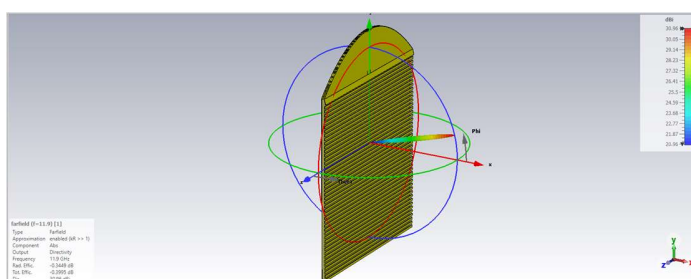
Рисунок 4.28 – Результаты расчета S_{11} -параметра (коэффициент отражения) при периоде дифракционной решетки: а) 14 мм; б) 20 мм

Полученные результаты электродинамического моделирования демонстрируют, что S-параметр планарной антенны соответствует уровню -10 дБ в рабочем частотном диапазоне. Рассматриваемое антенное устройство демонстрирует высокий уровень согласования вне зависимости от периода дифракционной решетки.

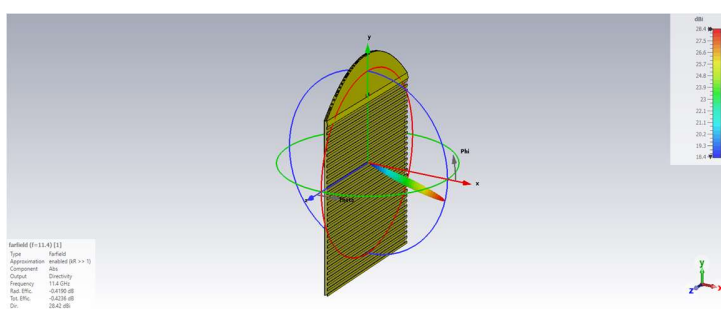
Изменение периода дифракционной решетки механическим способом позволяет осуществлять сканирование в азимутальной плоскости. Полученные в результате моделирования ДН представлены на Рисунке 4.29.



а)



б)



в)

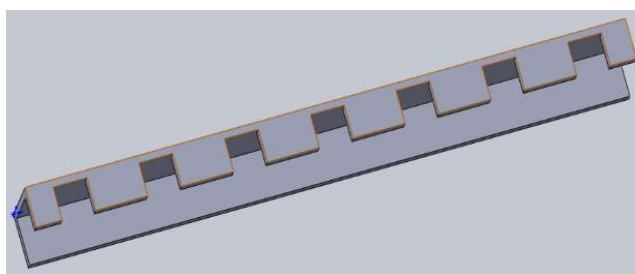
Рисунок 4.29 – Результаты моделирования ДН планарной антенны в зависимости от периода дифракционной решетки и частоты: а) 11 мм, 11 ГГц; б) 14 мм, 11.9 ГГц; в) 20 мм, 11.4 ГГц.

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° .

4.4 Измерение характеристик макета антенны на основе планарного волновода

В целях проведения натурных экспериментальных исследований был изготовлен макет антенны на основе планарного волновода с дифракционной решеткой. Габаритные размеры макета антенны $807 \times 600 \times 17$ мм, при толщине пластины из материала диэлектрика в составе планарного волновода 10 мм. Основным материалом для изготовления конструкции макета была выбрана латунь, в качестве материала диэлектрика для планарного волновода использовался полиэтилен, сформированный в плоский лист.

В целях удешевления стоимости макета, для проведения натурных испытаний конструкция макета была упрощена, вместо механизма, регулирующего период дифракционной решетки, были изготовлены П-образные направляющие. Изготовление элементов решетки осуществлялось с помощью 3D принтера Bambu Lab X1 Carbon. На Рисунке 4.30 представлена трехмерная модель направляющего элемента и фотография напечатанной детали.



а)



б)

Рисунок 4.30 – Модель направляющей дифракционной решетки: а) трехмерная модель; б) напечатанный на 3D принтере элемент

Для питания антенны был выбран медный прямоугольный волновод с каналом, имеющим размеры 9.5x19 мм; и соединенный с ним переходник с коаксиального кабеля на прямоугольный волновод. На рисунке 4.31 представлены прямоугольный волновод и преобразователь волн Waveguide to coaxial converter (WR75) 9.84-15 ГГц.



а)



б)

Рисунок 4.31 – Элементы питания макета антенны: а) прямоугольный волновод; б) преобразователь волн Waveguide to coaxial converter

Для оценки работоспособности разработанного и собранного макета антенного устройства проводились измерения основных характеристик – возвратные потери (S_{11} -параметр) и ДН. В процессе проводимых измерений использовалось оборудование:

- Векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZNB 20;

- Векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZNH4 с комплектом калибровки FSH-Z28;
- Генератор сигналов АКИП-3209;
- Анализатор спектра АКИП-4213/1;
- Приемная антенна Aaronia AG HyperLOG 7040.

На Рисунке 4.32 показан макет антенны, в процессе подготовки к измерениям в безэховой камере.



а)



б)

Рисунок 4.32 – Макет планарной антенны во время подготовки к натурным измерениям в безэховой камере

В процессе исследований измерения S_{11} -параметра проводились с периодом дифракционной решетки равной 20 мм, результат приводится на Рисунке 4.33.

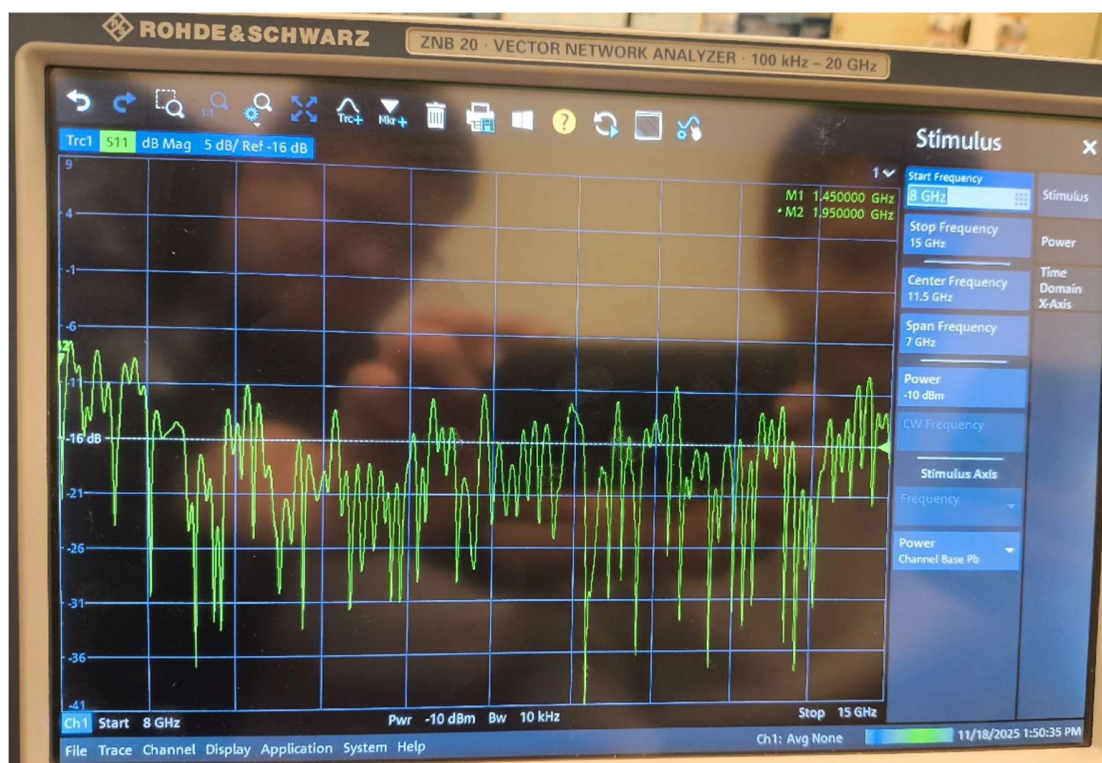
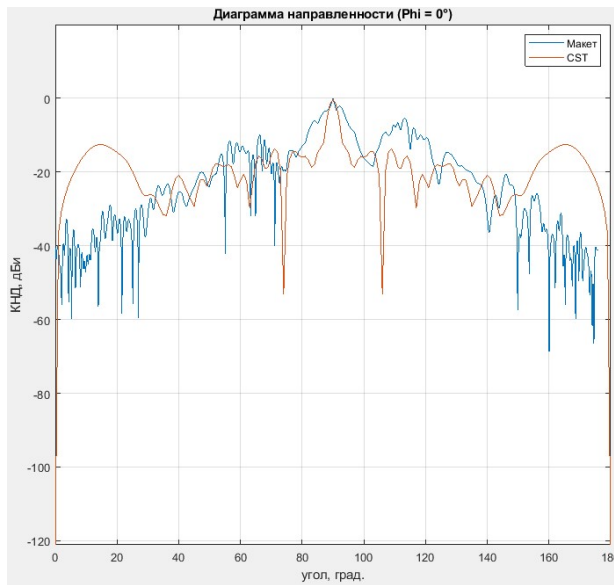


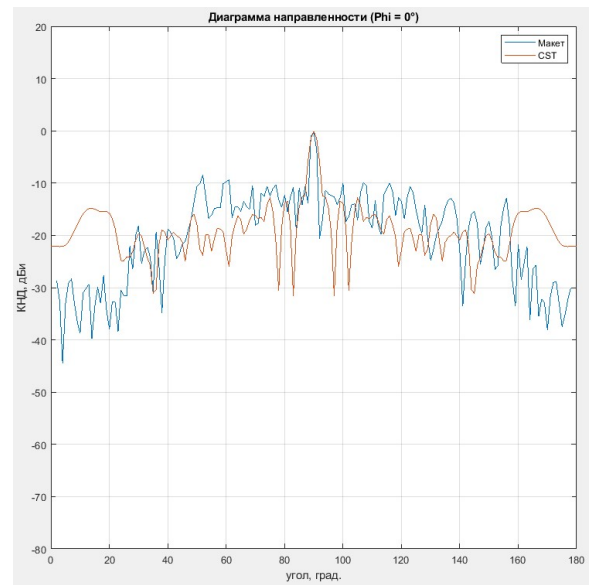
Рисунок 4.33 – Результаты измерений возвратных потерь планарной антенны

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 в данном диапазоне.

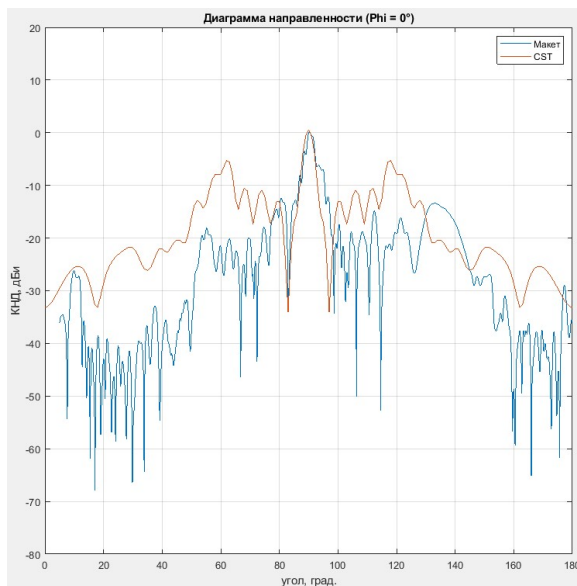
Измерение ДН антенны проводилось в двух плоскостях для оценки возможности азимутального и угломестного сканирования. Для этого антенна устанавливалась на вращающуюся платформу и располагалась в вертикальном и горизонтальном положении соответственно. Измерения проводились в передней полусфере составляющей 180° . Результаты измерений ДН в зависимости от рабочей частоты и периода дифракционной решетки приводятся на Рисунке 4.34.



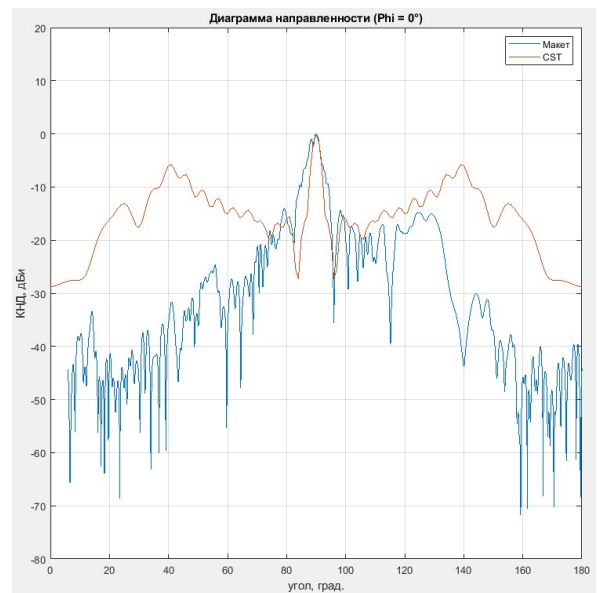
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.34 – 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 расчетной, 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 4.35.

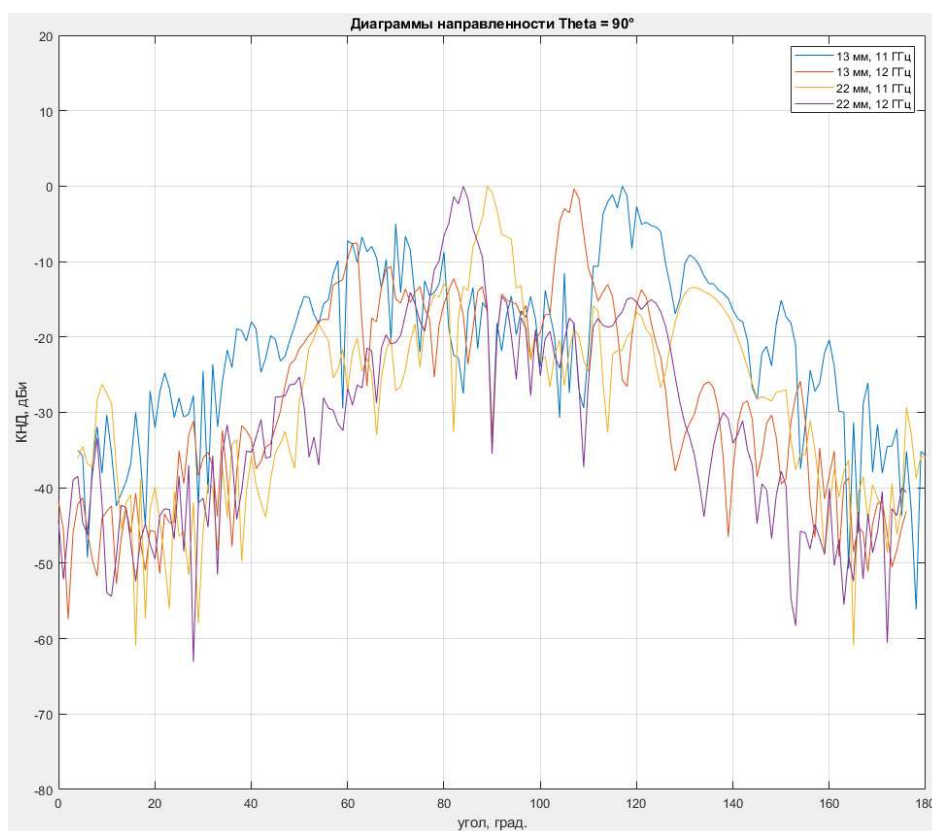


Рисунок 4.35 – Результаты измерений ДН при осуществлении азимутального сканирования в зависимости от частоты и периода

Полученные ДН демонстрируют возможность применения антенного устройства для осуществления частотного сканирования в угловом секторе от 85° до 115° , в зависимости от периода решетки и рабочей частоты, при этом сохраняется узкая форма главного луча.

4.5 Методика реализации антенных устройств с частотным сканированием на основе планарных элементов

Основные этапы методики проектирования антенных устройств с частотным сканированием на основе планарных элементов состоят из следующих шагов:

1. Выбор и разработка основных элементов модели антенного устройства, обеспечивающего частотное сканирование в широком угловом секторе. Проектирование диаграммообразующей системы, отвечающей техническим требованиям и соответствие массогабаритным параметрам системы. Определение допустимых параметров планарных элементов антенной решетки, обеспечивающих частотное сканирование, определение возможности осуществления сканирования в широком диапазоне углов.

2. Применение пакета численного электродинамического моделирования DS CST Studio Suite 2025 для проведения анализа характеристик антенного устройства на основе метода конечного интегрирования Вейланда, в пространственно-частотной и пространственно-временной областях.

2.1 Выбор оптимальных параметров сетки для проведения анализа и определение допустимого минимального числа ячеек необходимого для построения корректной модели антенны и снижения затрачиваемого на расчеты времени и требуемых мощностей ЭВМ. Проверка сходимости результатов расчетов в зависимости от числа разбиения на ячейки сетки.

3. Расчет основных параметров модели антенного устройства и верификация полученных результатов расчетов пространственно-частотной области относительно расчетов с различными параметрами сетки, определение возможных вариантов оптимизации модели антенны.

4. Осуществление параметрической оптимизации модели антенного устройства с целью получения наилучших характеристик антенного устройства, выбор схемы питания, определение необходимости включения в состав системы фазовращателей,

делителей мощности и других элементов. Расчет параметров упрощенной модели без учета антенного обтекателя с применением упрощенных моделей нагрузок и портов.

5. Исследование влияния погрешностей в размерах элементов антенного устройства, а также характеристик диэлектрических материалов с целью определения допустимого диапазона отклонения параметров от наилучших для подготовки модели к изготовлению макета.

5.1 Коррекция параметров модели антенного устройства с учетом допустимых погрешностей в размерах и характеристик диэлектрических материалов.

6. Изготовление макета антенного устройства для проведения экспериментальных натурных исследований и измерений основных параметров антенного устройства при осуществлении частотного сканирования.

7. Верификация результатов измерений полученных в процессе натурных испытаний. Корректировка макета антенны на основе проведенных исследований, сопоставление результатов измерений с электродинамической моделью в DS CST Studio Suite 2025.

4.6 Выводы по главе 4

В главе рассматриваются особенности антенных решеток, сформированных на основе планарных элементов, обладающих наиболее простой конструкцией и небольшими размерами. Плоские излучающие элементы и антенны вытекающей волны выступают в качестве основы для антенных устройств. Показаны варианты антенных устройств, обеспечивающих угломестное частотное сканирование, формирующих узкий главный лепесток ДН при низком УБЛ.

Продемонстрированы варианты конструкции антенных устройств, представляющих собой массивы из повторяющихся плоскостных элементов, таких как Н- плоскостные рупоры и парные желобковые волноводы. Антенные устройства формируют игловидную форму ДН, и обеспечивают возможность частотного

сканирования в широком угловом секторе. Для рассмотренных антенных устройств предложены варианты конструкции фазовращателей

Предложен вариант конструкции антенного устройства на основе планарного диэлектрического волновода и соединенной с ним дифракционной решетки. Планарная антенна отличается возможностью управления ДН механическим способом за счет изменения периода решетки торцевым вариантом возбуждения электромагнитной волны в планарном волноводе. В рабочем режиме поверхностная волна распространяется вдоль поверхности волновода, и за счет эффекта дифракции, на элементах решетки, формируется ДН перпендикулярная ее плоскости. Планарная антенна не требует сложных элементов и обладает простой для производства конструкцией.

Основным результатом данной главы является макет планарной антенны, изготовленный на основе спроектированной электродинамической модели. Были проведены натурные экспериментальные измерения характеристик в целях проверки их соответствия полученным в результате моделирования. Характеристики антенного устройства соответствуют расчетным. Конструкция планарной антенны обеспечивает возможность управления ДН при изменении частоты и периода дифракционной решетки при этом сохраняет характеристики излучения на высоком уровне во всем рабочем диапазоне частот.

Заключение

В рамках диссертационных исследований была разработана методология проектирования антенных решеток с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием. Основные характеристики антенных устройств позволяют обеспечить устойчивое функционирование систем связи в широком азимутальном секторе.

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы:

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологий в сфере антенных устройств, обеспечивающих однокоординатное и двухкоординатное частотно-коммутационное сканирование. Пара планарных волноводов, объединенных с металлическим перфорированным экраном в единую конструкцию, 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 возникновения 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 характеристик 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, обеспечивающая сканирование в полном азимутальном секторе;

4. Разработана и исследована конструкция планарной антенны на основе плоского диэлектрического волновода и дифракционной решетки. Конструкция устройства позволяет осуществлять механическое сканирование при изменении периода решетки, а также осуществлять частотное сканирование. Были проведены натурные испытания макета планарной антенны. У изготовленного макета были произведены измерения основных характеристик антенны в рабочем режиме.

Дальнейшие перспективы исследований по теме диссертации автор видит связанными с улучшением характеристик и оптимизации конструкции антенных устройств, производством рабочих антенных устройств.

Список сокращений и условных обозначений

5G – системы пятого поколения

АВВ – антенны вытекающей волны

АР – антенная решетка

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ВЩАР – волноводно-щелевая антенная решетка

ДН – диаграмма направленности

ДОУ – диаграммообразующее устройство

КВЧ – крайне высокие частоты

КНД – коэффициент направленного действия

КПД – коэффициент полезного действия

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

КУ – коэффициент усиления ПЛВ

МАР – Многолучевая антенная решетка

МЭМС – микроэлектромеханических систем

ПДВ – плоский диэлектрический волновод

РЛС – радиолокационная станция

САПР – система автоматизированного проектирования

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение

УБЛ – уровень боковых лепестков

ФАР – фазированная антенная решетка

ЭПР – эффективная площадь рассеяния

ЭДП – эффективной диэлектрической проницаемости

EMT – Effective Medium Theory – теория эффективной среды

MIMO – Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход

SIW – Substrate Integrated Waveguide – технология интегрирования с подложкой волновода

Список литературы

1. Кусайкин, Д. В. Системы MU-MIMO сети 5G с многолучевой линзовой антенной / Д. В. Кусайкин, А. Е. Каменсков // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, Москва, 30 ноября 2022 года. – Москва: Алеф, 2022. – С. 421-428. – EDN MCFDJV.
2. Base Station Multibeam Antenna for 5G Network Based on the Lunenburg Lens Structure / D. V. Denisov, S. N. Shabunin, D. V. Kusaykin, M. A. Klevakin // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021: 15, Novosibirsk, 19–21 ноября 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 260-263. – DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647657. – EDN HGJHLD.
3. Куроптев, П. Д. Использование линзы Лüneберга для улучшения диаграммы направленности рупорной антенны / П. Д. Куроптев, В. В. Левяков, А. В. Фатеев // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций "РТ-2017": Материалы 13-й международной молодежной научно-технической конференции, Севастополь, 20–24 ноября 2017 года / Под ред. А.А. Савочкина. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 153. – EDN XTNYJN.
4. Шепелев, В. А. Линзы Лüneберга для систем связи / В. А. Шепелев, Ю. Л. Соловьев, О. Ю. Малаховский // Радиотехника, электроника и связь ("РЭС-2011"): Сборник докладов Международной научно-технической конференции, Омск, 05–08 июля 2011 года / ФГУП "Омский научно-исследовательский институт приборостроения". – Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2011. – С. 430-434. – EDN TXVZKB.

5. Аджибеков, А. А. Построение многолучевых антенн абонентской радиолинии в S- и Ka- диапазонах частот / А. А. Аджибеков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 30-35. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.30.35. – EDN MSQFAF.

6. Сидоров, К. С. Проектирование многолучевой микрополосковой антенной решетки / К. С. Сидоров, И. В. Филимоненко // Современная наука. Актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей VII Международной научно-практической конференции: в 4 ч., Пенза, 05 июня 2019 года. Том Часть 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 38-41. – EDN LOOGEX.

7. Бобков, Н. И. Формирование частотно-независимых характеристик излучения широкополосных антенных решеток с равноамплитудным возбуждением элементов / Н. И. Бобков, П. Е. Сухопаров // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2018. – № 6(6). – С. 147-153. – EDN XQXAJV.

8. Яцышен, В. В. Радиолокация при наличии пассивных помех с помощью поляризованных электромагнитных волн и анализа рассеянного излучения / В. В. Яцышен, А. Ю. Гордеев // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. – 2012. – № 6. – С. 24-30. – EDN PEUELP.

9. Шошин, Е. Л. Радиооптический линзовый отражатель-излучатель / Е. Л. Шошин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 3. – С. 226-233. – DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-3-226-233. – EDN SFAWYG.

10. Ретрорефлекторные сферические системы стеклянных спутников "Блиц" / А. Л. Соколов, Ю. И. Меренкова, Г. И. Медведева, В. В. Мурашкин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2022. – № 4(141). – С. 108-122. – DOI 10.18698/0236-3933-2022-4-108-122. – EDN TCDDLМ.

11. Галуза, М. А. Диаграммообразующие системы для многолучевых антенн СВЧ и КВЧ / М. А. Галуза // Охрана, безопасность, связь. – 2021. – № 6-1. – С. 135-139. – EDN WJKLYH.

12. Тертышный, О. И. Исследование дифракционных характеристик линзовых антенн на примере линзы Люнеберга и Максвелла / О. И. Тертышный, В. В. Паслен // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 3-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 24–25 мая 2017 года. Том 6. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2017. – С. 83-87. – EDN UYLEUP.

13. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А. В. Шишлов, Б. А. Левитан, С. А. Топчиев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 7. – С. 1. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.6. – EDN VABFJM.

14. Моделирование многолучевой антенной решётки на основе полусферической диэлектрической многослойной линзы / Д. С. Алиев, Ю. В. Дорошева, А. В. Иванов, Г. Л. Федий // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2019. – № 9. – С. 107-114. – EDN ZBMVFR.

15. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны Часть 2. Антенные системы РЭС РТВ. / Долбик А. И., СПб: ФВУ ПВО, 2004. 104 с.

16. Кусайкин, Д. В. 3D-печать сферической линзовой антенны в форме многогранника Голдберга / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции, Омск, 04–06 октября 2023 года. – Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2023. – С. 108-110. – EDN DZIABZ.

17. Исследование печатной цилиндрической линзы Люнеберга / А. А. Кузиков, Р. С. Орехов, Ю. П. Саломатов, М. И. Сугак // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 426-430. – EDN XUGJHF.

18. Линников, С. И. Анализ конструкции перфорированной линзовой антенны Люнеберга / С. И. Линников // Наука и практика: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 февраля 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 30-32. – EDN VHHEDF.

19. Анализ характеристик многолучевой сферической линзовой антенны Кадиапазона / М. Б. Мануилов, К. В. Кобрин, В. А. Следков, Z. Li // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1-2. – С. 180-181. – EDN HRXBVN.

20. Саломатов, Ю. П. Моделирование неоднородной линзы Люнеберга / Ю. П. Саломатов, А. С. Дранишников // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 8-2. – С. 82-84. – EDN RKRVKT.

21. Рязанцев, Р. О. Параметры пространственной дискретизации квазисферической плоскостойкой линзовой антенны / Р. О. Рязанцев, Ю. П. Саломатов // Антенны и распространение радиоволн: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 92-96. – EDN YTWIDZ.

22. Применение технологии 3D печати при изготовлении антенн мм-диапазона / Ю. Г. Антонов, С. В. Балландович, Г. А. Костиков [и др.] // Антенны и распространение радиоволн: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 97-101. – EDN YTWHJR.

23. Разработка многолучевой антенной системы на базе диэлектрической линзы с использованием метода квазиконформных оптических преобразований / А. В. Лазарев, А. Ю. Киселев, Г. К. Усков, А. М. Бобрешов // Антенны и распространение радиоволн: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. – С. 33-35. – EDN GCPWRA.

24. Банков, С. Е. Двухслойная планарная линза Люнеберга / С. Е. Банков // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 12. – С. 15. – EDN PXPOFH.

25. Орехов, Р. С. Многолучевая антенна на основе цилиндрической линзы Люнеберга / Р. С. Орехов // Антенны и распространение радиоволн: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 102-106. – EDN YTWHJZ.

26. 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.

27. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны Часть 1. / Долбик А. И., СПб: ФВУ ПВО, 2002. 100 с.

28. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. / М.: Высшая школа, 1988. 432 с.

29. Design and research of single-sided slotted waveguide antenna with a large beam declination / Ch. Zhao, X. Li, Ch. Sun [et al.] // IET Microwaves Antennas & Propagation. – 2021. – Vol. 15, No. 2. – P. 163-173. – DOI 10.1049/mia2.12035. – EDN VJGDKQ.

30. S. R. Rengarajan and R. E. Hodges, "Waveguide-Fed Slot Arrays in Space Application: A Review," 2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Honolulu, HI, USA, 2021, pp. 362-362, doi: 10.1109/ICEAA52647.2021.9539836.

31. Влияние геометрии и топологии расположения щелей в волноводе на характеристики линейных волноводно-щелевых антенных решеток / А. Д. Гладких, С. И. Иванов, А. П. Лавров, С. В. Розов // Неделя науки ИЭиТ: Материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 20–25 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 57-59. – EDN BDPBPD.

32. Калошин, В. А. Антенная решетка вытекающей волны / В. А. Калошин, К. Т. Нгуен // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 1. – С. 9. – DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.14. – EDN MWIELM.

33. Разумихин, А. С. Пути снижения уровня боковых лепестков в щелевых антенных решетках / А. С. Разумихин, К. А. Лайко, Ю. О. Филимонова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 15-19. – DOI 10.21293/1818-0442-2020-23-1-15-19. – EDN HDMDMH.

34. Кюн Р. Микроволновые антенны. / Л.: Судостроение, 1967. – 518 с.

35. Granet, C. Modern Antenna Handbook: Aperture Antennas: Waveguides and Horns, in Modern Antenna Handbook / C. Granet, G. L. James, A. R. Forsyth. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 1659 p. – ISBN 978-0-470-03634-1. – EDN WEWQHN.

36. Пресняков, С. А. Моделирование ячейки замедляющей системы типа "петляющий волновод" с учётом пролётного канала / С. А. Пресняков, Н. П. Кравченко, С. В. Мухин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 224-227. – EDN VOUFJP.

37. Кравченко Н.П., Мухин С.В., Пресняков С.А. Замедляющие системы миллиметрового диапазона // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №6. – С. 57-63.

38. Накрап, И. А. Замедляющая система типа гребенка в волноводе с переменным поперечным сечением пластин / И. А. Накрап, А. Н. Савин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2015): Материалы докладов 25-ой Международной Крымской конференции. В 2-х томах, Севастополь, 06–12 сентября 2015 года. Том 1. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2015. – С. 149-150. – EDN LZXYZV.

39. Давидович, М. В. Замедляющая система прямоугольный волновод с периодическими диафрагмами / М. В. Давидович, Н. А. Бушуев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 661-665. – EDN XUGJXF.

40. Терентюк, А. Г. Моделирование ЛБВ с замедляющей системой типа "петляющий волновод" на основе нестационарной дискретной теории / А. Г. Терентюк, Н. М. Рыскин, А. Г. Рожнев // Проблемы СВЧ электроники. – 2017. – Т. 3. – С. 22-23. – EDN TCTIWO.

41. Разработка замедляющей системы типа "петляющий волновод" для ЛБВ Q-диапазона и её изготовление с помощью новых технологий фотополимерной 3D-печати / А. А. Иванов, М. Д. Проявин, М. В. Морозкин [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2022. – № 4. – С. 11-12. – EDN XVJYSH.

42. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation / S. Bhattacharjee, J.H. Booske, C.L. Kory, D.W. van der Weide, S. Limbach, S. Gallagher, J.D. Welter, M.R. Lopez, R.M. Gilgenbach, R.L. Ives, M.E. Read, R. Divan, D.C. Mancini // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Vol. 32, No 3. – P. 1002–1014.

43. Возможности создания широкополосных хаотических генераторов на основе семейства импульсных ЛБВ W-диапазона / А. А. Иванов, М. С. Нагорнюк, А. Е. Смирнов [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 2. – С. 238-242. – DOI 10.31857/S0367676520020143. – EDN RTASTA.

44. W-Band and D-Band Traveling-Wave Tube Circuits Fabricated by 3D Printing / Alan M. Cook; Colin D. Joye; Jeffrey P. Calame. IEEE Access (Volume: 7), 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920291

45. R. L. Jaynes, A. M. Cook, C. D. Joye, E. L. Wright, D. E. Pershing and K. T. Nguyen, "Characterization of W- band Serpentine Waveguide TWT Circuits," 2019 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Busan, Korea (South), 2019, pp. 1-2, doi: 10.1109/IVEC.2019.8744882.

46. Заргано, Г. Ф. Исследование волноводно-щелевой антенной решетки с диэлектрическим заполнением / Г. Ф. Заргано, А. М. Лерер, А. О. Пелевин //

Физические основы приборостроения. – 2020. – Т. 9, № 3(37). – С. 28-31. – DOI 10.25210/jfor-2003-028031. – EDN NUCKLH.

47. Калошин, В. А. Линейная волноводно-щелевая антенная решетка со 180-градусным сектором частотного сканирования / В. А. Калошин, В. И. Калиничев // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 7. – С. 678-683. – DOI 10.1134/S0033849419060032. – EDN ZTKNGX.

48. Калиничев, В. И. Характеристики излучения линейной волноводно-щелевой решетки с широким сектором частотного сканирования / В. И. Калиничев, В. А. Калошин // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 2. – С. 9. – DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.7. – EDN XDLJDD.

49. Ranzani, D. Kuester, K. J. Vanhille, A. Boryssenko, E. Grossman and Z. Popović, "G-Band Micro-Fabricated Frequency-Steered Arrays With 2 GHz Beam Steering," in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 3, no. 5, pp. 566-573, Sept. 2013, doi: 10.1109/TTHZ.2013.2271381.

50. A. Boryssenko and K. Vanhille, "300 GHz microfabricated waveguide slotted arrays," 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Tucson, AZ, USA, 2014, pp. 1-2, doi: 10.1109/IRMMW-THz.2014.6956408.

51. Уолтер К. Антенны бегущей волны. Пер. с англ. под ред. А. Ф. Чаплина. – М.: Энергия, 1970, 448 с. 2.

52. Калошин, В. А. Широкополосная антенна вытекающей волны с фиксированным лучом / В. А. Калошин, К. Т. Нгуен // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 253-257. – DOI 10.31857/S0033849421030098. – EDN JQVRRK.

53. Мануилов, М. Б. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток / М. Б. Мануилов, В. А. Лерер, Г. П. Синявский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 5. – С. 1-29. – EDN IBIAVV.

54. Банков С. Е. Антенные решетки с последовательным питанием / Банков С.Е. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 414, [1] с.: ил. — Библиогр.: с. 409-414. [Изд. при поддержке РФФИ]. — ISBN 978-5-9221-1405-9.

55. Murano K., Watanabe I., Kasamatsu A., Suzuki S., Asada M. Withayachumnankul W., Tanaka T., and Monnai Y. Low-Profile Terahertz Radar Based on Broadband Leaky-Wave Beam Steering. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, 2017, Vol. 7, No. 1, pp. 60-69.

56. Калиничев, В. И. Частотное сканирование антенны вытекающей волны на прямоугольном волноводе, заполненном диэлектриком / В. И. Калиничев, А. А. Бабаскин // Журнал радиоэлектроники. — 2016. — № 8. — С. 4. — EDN WTHCHR.

57. Калиничев, В. И. Частотно-фазовое сканирование волноводно-щелевых антенных решеток, заполненных диэлектриком / В. И. Калиничев, А. А. Бабаскин // Журнал радиоэлектроники. — 2017. — № 9. — С. 8. — EDN ZRJEGD.

58. J. Liu, D. R. Jackson and Y. Long, "Modal Analysis of Dielectric-Filled Rectangular Waveguide With Transverse Slots" in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3194-3203, Sept. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2161444.

59. M. Manuilov, V. Lerer and G. Sinyavsky, "Fast and accurate full-wave analysis of large slotted waveguide array antennas," 2007 European Microwave Conference, Munich, Germany, 2007, pp. 360-363, doi: 10.1109/EUMC.2007.4405201.

60. Калиничев, В. И. Анализ и синтез волноводно-щелевой антенны с заданным амплитудным распределением / В. И. Калиничев // Журнал радиоэлектроники. — 2015. — № 12. — С. 8. — EDN VHTMSH.

61. Сучков, А. В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием / А. В. Сучков // Труды МАИ. — 2016. — № 86. — С. 11. — EDN VUDSRF.

62. Калошин, В. А. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования / В. А. Калошин, Д. Т. Ле, Е. В. Фролова // Журнал

радиоэлектроники. – 2020. – № 3. – С. 10. – DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.9. – EDN QZICPG.

63. Банков, С. Е. Исследование характеристик частотно-фазового сканирования сфокусированной волноводно-щелевой решётки / С. Е. Банков, В. А. Калошин, Е. В. Фролова // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – С. 5. – EDN ZFHVDZ.

64. Калошин, В. А. Радиообъектив с частотно-фазовым сканированием на основе волноводно-щелевой решётки вытекающей волны / В. А. Калошин, Е. В. Фролова // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 3. – С. 8. – EDN XODNET.

65. Калиничев, В. И. Анализ двумерно-периодической волноводно-щелевой решетки с частотно-фазовым сканированием луча / В. И. Калиничев, А. А. Бабаскин // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 2. – С. 6. – EDN VOWSVN.

66. Седельников, Ю. Е. Линейные антенные решетки КВЧ диапазона на диэлектрических волноводах / Ю. Е. Седельников, Е. Ю. Олейник, М. Шаабан // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – С. 8. – DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.1. – EDN VAQINQ.

67. Галуза, М. А. Плоская антенна СВЧ с высоким коэффициентом усиления и низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности / М. А. Галуза, Д. А. Ерошенко, А. И. Климов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2022. – № 4. – С. 124-133. – EDN PYUKUI.

68. Белозерцев, Ю. В. Полосковые антенные решетки с многолучевыми диаграммообразующими системами на основе плоских линз из однородного диэлектрика / Ю. В. Белозерцев, М. А. Галуза, А. И. Климов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – № 2. – С. 169-179. – EDN KWYXIX.

69. Плоские антенные решетки вытекающей волны для применения в миллиметровом диапазоне / С. А. Антипов, Д. Н. Борисов, Д. А. Ерошенко, А. И. Климов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 6-3. – С. 36-40. – EDN RXKQOJ.

70. Oliner A.A., Jackson D.R. Leaky-Wave Antennas: Ch. 11 in Antenna Engineering Handbook, J. L. Volakis, Ed., New York: McGraw-Hill, 2007. 1755 P.

71. Патент № 2258285 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 21/24, H01Q 21/29. Планарная антенна: заявл. 21.11.2003: опубл. 10.08.2005 / С. Е. Банков, В. А. Калошин; заявитель САМСУНГ ЭЛЕКТРОНКС КО., ЛТД. (KR), ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (RU).

72. Патент № 2432650 С1 Российская Федерация, МПК H01Q 13/00, (2006.01). Плоская антенна с управляемой поляризационной характеристикой: заявл. 22.03.2010: опубл. 27.10.2011 / Ю. Б. Нечаев, А. И. Климов, А. В. Золотухин, М. Ю. Сидоров; заявитель Открытое акционерное общество «Концерн «Созвездие».

73. Кирпичева, И. А. Двухэтапная оптимизация апертуры антенны дифракционного излучения с косекансной диаграммой направленности / И. А. Кирпичева, А. В. Останков // Антенны и распространение радиоволн: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 17–19 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. – С. 165-169. – EDN YTWHVJ.

74. Улучшение показателей направленности антенны дифракционного излучения методом вариации профиля, излучающего раскрыва / Д. Ю. Крюков, А. В. Останков, А. Ю. Чернышев, С. Ю. Дашян // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 79-90. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.1.009. – EDN RZVVLA.

75. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.Г. Унгер; пер. с англ. под ред. В.В. Шевченко. - М.: Мир, 1980. - 656 с.

76. Корнблит, С. СВЧ оптика: оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн / С. Корнблит; пер. с англ. под ред. О. П. Фролова, М.: Связь, 1980. 359 с.

77. Д. В. Кусайкин Обзор конструкций линзовых антенн Люнеберга, изготовленных методами 3D-печати. / Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2024; Т. 27, № 2. – С. 6-36. –<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2024-27-2-6-36>

78. A. Petosa, A. Ittipiboon and S. Thirakoune, "Shadow blockage improvement using a perforated dielectric Fresnel lens," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450), Columbus, OH, USA, 2003, pp. 514-517 vol.4, doi: 10.1109/APS.2003.1220323.

79. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия 1973 Г. 440 с.,

80. Устройства СВЧ и антенны: учебник / А. А. Филонов, А. Н. Фомин, Д. Д. Дмитриев [и др.]; ред. А. А. Филонов. – Красноярск: Сиб.федер. ун-т, 2014. – 492 с.

81. Авдеев, С. М. Линзовые антенны с электрически управляемыми диаграммами направленности / С. М. Авдеев, Н. А. Бей, А. Н. Морозов; под ред. Н. А. Бея. - М: «Радио и связь» 1987 г. - 128 с.

82. Антенная система с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга с концентрическими кольцами / А. В. Ашихмин, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Ф. С. Сафонов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 54-64. – DOI 10.36622/VSTU.2021.17.2.009. – EDN GWLUOW.

83. 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.

84. 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.

85. Журнал «Беспроводные технологии», № 1, 2007. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/2007_2_12.pdf (дата обращения: 11.05.2026).

86. Антонов, А. С. Двухрезонансная антенна L-диапазона круговой поляризации / А. С. Антонов, Е. Л. Капылов // Антенны и распространение радиоволн: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2024. – С. 33-36. – EDN RVSORD.

87. Куприц, В. Ю. Анализ характеристик спиральных антенн спутниковых радионавигационных систем / В. Ю. Куприц, В. Ю. Лебедев, А. А. Мещеряков // 27-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2017): Материалы конференции: В 9 томах, Севастополь, 10–16 сентября 2017 года. Том 3. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 676-681. – EDN YSBSEK.

88. Zhang Li, Schwieger V. Investigation of a L1-optimized choke ring ground plane for a low-cost GPS receiver-system // Journal of Applied Geodesy. 2017. Vol. 12, № 1. P. 1—10. doi: 10.1515/jag-2017-0026

89. Ахияров, В. В. Антенна УКВ-диапазона с низким уровнем боковых лепестков / В. В. Ахияров, С. Д. Сапрыкин, М. А. Утенков // Распространение радиоволн: Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции, Калининград, 28 июня – 03 июля 2021 года. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. – С. 572-577. – EDN PAZCOD.

90. 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.

91. 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 RIPILN.

92. 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.

93. Во Ба Ау. Низкопрофильная антенная решетка сильно связанных диполей круговой поляризации / Во Ба Ау, И. Н. Бобков, Ю. В. Юханов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4(240). – С. 188-196. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-188-196. – EDN QKMENQ.

94. 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.

95. Коническая спиральная антенна для излучения сверхширокополосных импульсов / Ю.А. Андреев, М.Ю. Зоркальцева, В.И. Кошелев, К.Н. Сухушин // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 8-3. С. 35-39

96. Влияние геометрии и топологии расположения щелей в волноводе на характеристики линейных волноводно-щелевых антенных решеток / А. Д. Гладких, С. И. Иванов, А. П. Лавров, С. В. Розов // Неделя науки ИЭиТ : Материалы Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 20–25 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 57-59. – EDN BDPBPD.

97. C. B. Top, "Design of a slotted waveguide array antenna and its feed system," M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2006.

98. Соломаха, Г.А. Волноводно-щелевые решетки с электронным управлением лучом / Г.А. Соломаха, А. А. Сочава // Научный форум с международным участием "Неделя науки СПбПУ": материалы научно-практической конференции, 1-6 декабря 2014 года. - Санкт-Петербург. 978- 5-7422-4718-0., 2015. - Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ: материалы научно-практической конференции / [редкол.: В.Э. Гасумянц, Д.Д. Каров (отв. ред.) и др.]. - С. 25-27. - ("Радиофизика"). - Библиогр.: с. 27. ISBN: 978-5-7422-4718-0

99. Электронные и ионные приборы / В. Ф. Власов. - 3-е изд., перераб., доп. - М.: Связьиздат, 1960. - 733 с.

100. Смольянов, Н. Б. 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.

101. 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.

102. Силин Р. А. Периодические волноводы. — М.: ФАЗИС, 2002. 438 с.

103. 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.

104. Петрушанский М. Г. Основы конструирования антенных решеток. Учебное пособие. Оренбург: Оренбургское ГУ, 2017. – 115 с.

105. Антенна на основе метаматериала для сканирования сектора пространства / А. В. Останков, Е. Г. Хрипунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 2. – С. 116-125. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.2.017. – EDN OTDKTS

106. 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 UBSEPQ

107. Разработка и исследование линейной антенной решетки из печатных логопериодических антенн, запитанных с помощью линзы Ротмана / А. В. Ашихмин, А. В. Иванов, Ю. Г. Пастернак [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 73-78. – DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.010. – EDN EYTXRP.

108. Ищенко Е.А. Разработка и исследование антенн с частотным сканированием для обнаружения малых высокоомобильных роботизированных комплексов: дис. канд. техн. наук 2.2.14 / Ищенко Е.А. – Воронеж., 2025. – 166 с.

109. 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

110. Cloutier G., Bekefi G. Scanning characteristics of microwave aplanatic lenses // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1957. 5 (4). 391-396. DOI: 10.1109/TAP.1957.1144527

111. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры / В.П. Шестопалов. — Киев: Наук, думка, 1985. — 216 с.

112. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 2. Источники. Элементная база / В.П. Шестопалов. — Киев: Наук. думка. 1985. — 256 с.

113. Плоские антенны вытекающей волны СВЧ и КВЧ с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности / В. В. Вереитин, Д. А. Ерошенко, Н. А. Ивочкин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12, № 5. – С. 87-91. – EDN WVOPFH.

114. Пастернак Ю.Г. Математическое моделирование, оптимизация и автоматизированное проектирование дифракционных и вибраторных мобильных антенных решеток / Ю. Г. Пастернак; под ред. В. И. Юдина. — Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1999. — 257 с.

115. Однослойные антенные решетки вытекающей волны с центральным питанием / Д. Н. Борисов, Д. А. Ерошенко, А. И. Климов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 1. – С. 74-78. – EDN TNPXYZ.

116. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматическое проектирование. / В. Фуско. — М.: Р. и С., 1990. — 288 с.

117. Останков, А. В. Решение задачи дифракции электромагнитной волны на периодической многослойной гребенчатой структуре и его применение для анализа перспективных вариантов микроволновых антенн дифракционного излучения / А. В. Останков // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2015. — № 5-6. — С. 20-27. — EDN UHWCDF.

118. Останков, А. В. Расчет параметров решетки из проводящих лент на экранированном диэлектрическом волноводе для антенны дифракционного излучения / А. В. Останков, И. А. Кирпичева // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. — 2015. — № 1-2. — С. 3-10. — EDN TMOUMR.

119. Ф. Ф. Дубровка Разрежение спектра пространственных гармоник периодических структур / Дубровка Ф. Ф., В. И. Найденко // Вестник НТУУ "КПИ". Серия Радиотехника, Радиоаппаратоборудование. 1979. №16.

120. Характеристики излучения офсетной отражательной антенны, возбуждаемой решеткой комбинированных антенн / Ю. И. Буянов, Е. В. Балзовский, В. И. Кошелев, Э. С. Некрасов // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 7(739). — С. 111-115. — DOI 10.17223/00213411/62/7/111. — EDN TIWCXO.

121. Гаврилов, В. М. Сверхширокополосная параболическая антенна для систем связи / В. М. Гаврилов, В. К. Дементьев, Ф. В. Силуянов // Проектирование и технология электронных средств. — 2022. — № 4. — С. 29-32. — EDN BIULCO.

122. 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.

123. Спиридонова, А. В. Современные тенденции развития фазовращателей на основе микроэлектромеханических систем и варикапов / А. В. Спиридонова, Е. Д.

Челноков // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции. Посвящается 80-летию президента РТУ МИРЭА, академика РАН, доктора физико-математических наук, профессора А.С. Сигова, Сочи, 01–10 октября 2025 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2025. – С. 282-287. – EDN ICIZYT.

124. Комиссарова, Е. В. Конструкторско-технологические аспекты разработки фазовращателя коротковолновой части миллиметрового диапазона волн / Е. В. Комиссарова, В. М. Крехтунов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 10. – С. 194-210. – DOI 10.7463/1015.0823162. – EDN VDRGNT.

125. Особенности построения фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн для РЛС зенитно-ракетного комплекса малой дальности / О. Ю. Шевцов, А. В. Артюшев, В. М. Крехтунов [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2010. – № 3(65). – С. 61-69. – EDN MUJEGX.

126. Исследование быстродействующих отражательных волноводных ферритовых фазовращателей КВЧ диапазона / Е. В. Комиссарова, Ю. С. Русов, А. А. Будкин, В. М. Крехтунов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 11. – С. 41. – EDN OKIHIR.

127. Замешаева, Е. Ю. Проектирование аналоговых фазовращателей отражательного типа, управляемых варикапом / Е. Ю. Замешаева, И. Б. Вендик // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2012. – № 6. – С. 105-112. – EDN PXAEON.

128. 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.

129. 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.

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «ВГТУ»
Башкиров А.В.
« 16 » 09 2026 г.

**АКТ
о внедрении результатов диссертации
в учебный процесс Воронежского государственного технического университета**

Наименование диссертации: Антенные решетки с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием для комплексов радиолокации и спутниковой связи.

Автор: Смолянов Никита Борисович.

Научный руководитель: Проскурин Дмитрий Константинович.

Диссертация выполнена в Воронежском государственном техническом университете на кафедре радиоэлектронных устройств и систем, в рамках основного научного направления – Исследование и разработка антенных решеток, обеспечивающих широкоугольное однокоординатное и двухкоординатное сканирование для радиолокационных комплексов и систем спутниковой связи.

Результаты научно-исследовательской работы **внедрены в учебный процесс ВГТУ** на основании решения кафедры радиоэлектронных устройств и систем от «16» 09 2026 г., протокол № 2.

1. Вид результатов, внедренных в учебный процесс:

– методика проектирования фазированных антенных решеток на основе метаматериалов, реализованная с помощью параметрического синтеза, в целях снижения влияния эффекта ослепления в секторе сканирования и обеспечения круговой поляризации;
– методика проектирования планарной антенны на основе диэлектрического волновода и дифракционной решетки, для частотного сканирования в широком секторе обзора.

2. Области применения:

– лекционные, лабораторные, практические занятия, а также дипломные работы по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны» направления подготовки 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы (направленность «Радиоэлектронные системы передачи информации»).

3. Форма внедрения:

– методические указания к лабораторным работам;
– методические указания по практическим занятиям.

4. Эффект от внедрения: повышение качества образования, достигаемое за счет новых знаний о методах синтеза и анализа антенных систем, обеспечивающих широкоугольное сканирование, способов параметрической оптимизации.

Проректор по учебной работе
С.А. Яременко
« 16 » 09 2026 г.

Декан факультета ФРТЭ
В.А. Небольсин
« 16 » 09 2026 г.

Заведующий кафедрой РЭУС
Д.В. Журавлев
« 16 » 09 2026 г.



**Акционерное общество
Научно-производственное предприятие
«Автоматизированные системы связи»**

394019, Россия, г. Воронеж, пер. Газовый, д.2А, офис 212
тел/факс +7 (473) 210-47-42, e-mail: tg69925@yandex.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
АО НПП «Автоматизированные системы связи»
(г. Воронеж)

к.т.н.  Пендюрин В. А.

« 18 » 2026 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Смольянова Никиты Борисовича, выполненной на
соискание ученой степени кандидата технических наук

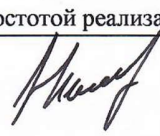
Комиссия в составе: председателя комиссии – заместителя генерального директора по науке, к.т.н., доцента Коровина Алексея Вячеславовича, членов комиссии: начальника сектора Гусева Бориса Леонидовича, подтверждает, что перечисленные ниже результаты, полученные Смольяновым Н.Б., внедрены в АО НПП «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж).

ПЕРЕЧЕНЬ ВНЕДРЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

№	Наименование внедренных результатов	Итоговая эффективность внедренных результатов
1	Конструкция антенной системы с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга	Разработана конструкция антенны, представляющая собой ТЕМ-рупор, образованный двумя скругленными металлическими элементами, на основе плоской линзы Люнеберга. Конструкция способна обеспечивать широкоугольное секторное сканирование по азимуту. Преимуществом предложенного решения является широкая полоса рабочих частот, а также простота изготовления и реализации антенной системы.
2	Конструкция антенной системы с кольцевыми дроссельными экранами для	Разработанная конструкция антенны с кольцевыми дроссельными экранами нейтрализует возникающий эффект многолучевости, и обеспечивает высокие характеристики правой и левой круговой поляризации,

	систем глобальной спутниковой навигации	обеспечивающие высокую пропускную способность канала. Разработанная антенна обладает малыми габаритами и простотой реализации.
--	---	--

Председатель комиссии



Коровин А.В.

Члены комиссии



Гусев Б.Л.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО **ИРКОС**

Почта: Россия, 129626, Москва, а/я 30
 Офис: Россия, 129085, Москва,
 Звездный б-р, д. 21, стр. 1, пом. I, к. 10

Телефоны:
 E-mail:
 Интернет:

(495) 615-7302, 615-0838
 info@ircos.ru
 www.ircos.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «ИРКОС»
 (г. Москва),

доктор технических наук

А.М. Рембовский

« 7 » сентября 2026 г.

Акт внедрения

результатов диссертации Смольянова Никиты Борисовича «Антенные решетки с однокоординатным и двухкоординатным широкоугольным сканированием для комплексов радиолокации и спутниковой связи», выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Мы, члены комиссии, назначенной генеральным директором АО «ИРКОС», д.т.н. Рембовским Анатолием Марковичем, в следующем составе: председатель комиссии – директор ОСП АО «ИРКОС», д.т.н., профессор Ашихмин Александр Владимирович и члены комиссии – директор АО «ИРКОС» по научной работе, к.т.н., доцент Козьмин Владимир Алексеевич, старший научный сотрудник, доктор технических наук, профессор Токарев Антон Борисович, начальник проектного отдела, к.т.н. Першин Павел Викторович, подтверждаем, что перечисленные ниже результаты, полученные Смольяновым Никитой Борисовичем и изложенные в статьях журналов, рекомендованных ВАК РФ к публикации результатов кандидатских диссертаций:

1. 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 [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 2. – С. 182-186. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.2.028. – EDN JDTLRN;

2. Антенная решетка из сегменто-параболических элементов с частотным сканированием в угломестной плоскости / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Д. К. Проскурин [и др.] // Теория и техника радиосвязи. – 2025. – № 1. – С. 76-81. – EDN BGUJOC;

3. Использование активного метаматериала для формирования сканирующей антенны / Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин [и др.] // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 3. – С. 71-75. – EDN UBSEPQ,
 внедрены в АО «ИРКОС».

Перечень внедренных результатов

№	Наименование внедренных результатов	Итоговая эффективность внедренных результатов
1	Методика проектирования многолучевых антенных устройств для систем спутниковой навигации.	Повышение отношения сигнал/шум на 4-6 дБ по сравнению с анализатором радиосетей, оснащенным патч-антенной. Использовано в разработке портативного анализатора радиосетей АРСЕНАЛ-И для приема сигналов спутниковой навигации.
2	Методика проектирования многолучевых антенных систем на основе плоской полноазимутальной линзы Люнеберга для радиопеленгаторов СВЧ диапазона.	Повышение чувствительности радиопеленгаторов СВЧ диапазона на 8-10 дБ по сравнению с радиопеленгаторами, оснащенными антенными решетками из вибраторных элементов. Использовано при разработке радиопеленгаторов нового поколения.

Председатель комиссии
д.т.н., профессор

Члены комиссии
к.т.н., доцент

д.т.н., профессор

к.т.н.

 А.В. Ашихмин
 В.А. Козьмин
 А.Б. Токарев
 П.В. Першин