

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



Рогозин Руслан Евгеньевич

**МНОГОЛУЧЕВЫЕ ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ
АППАРАТУРЫ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Пастернак Юрий Геннадьевич,
доктор технических наук,
профессор

Воронеж – 2023

Оглавление

Введение.....	5
1. Анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства многолучевых линзовых антенных систем.....	13
1.1 Анализ современных подходов к созданию линзовых МЛА на основе линз из однородных диэлектриков и апланатических линз	13
1.1.1 Линзы из однородных диэлектриков.....	13
1.1.2. Апланатические линзы.....	18
1.2. Линзы Люнеберга	23
1.3. Применение искусственных диэлектриков и метаматериалов для изготовления линзовых антенн.....	29
1.3.1. Обзор первых искусственных сред и линзовых антенн на их основе	29
1.3.2. Метаматериалы. Сферы их применения	32
1.3.3. Применение метаматериалов для создания многолучевых линзовых антенн.....	34
1.3.4. Применение свойств трансформационной оптики для создания МЛА линзового типа	38
1.4. Многолучевые антенны на основе плоских печатных линз	40
1.5 Выводы по первой главе	44
2. Исследование и разработка МЛА линзового типа на основе параллельных печатных плат	45
2.1. Методика расчета эффективных параметров метаматериала на основе измеренных компонентов комплексной матрицы рассеяния	46
2.2. Исследование цилиндрической линзы, состоящей из параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями	50
2.2.1. Эффективные параметры метаматериала Н-образной структуры. 51	
2.2.2. Направленные и частотные характеристики цилиндрической линзы из параллельных печатных плат с нанесенной периодической Н-образной структурой метаматериала	53
2.3. Влияние дисперсии метаматериалов на направленные и частотные характеристики цилиндрической линзы Люнеберга.....	63
2.3.1. Цилиндрическая линза Люнеберга с фокусом на поверхности	65
2.3.2. Цилиндрическая линза Люнеберга с вынесенным фокусом	68
2.4. Полусферическая метаматериальная линза из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров ..	74

2.4.1. Эффективные параметры метаматериала, имеющего форму иерусалимского креста с впаянным в центре металлическим стержнем	75
2.4.2. Многолучевая антенная система на основе полусферической метаматериальной линзы.....	79
2.5. Сферическая линза Люнеберга из параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями	82
2.6. Разработка и исследование двухкоординатной МЛА на основе многослойной печатной линзы	89
2.7. Выводы по второй главе.....	96
3. Сферические линзы Люнеберга.....	99
3.1. Исследование направленных и частотных свойств линзы Люнеберга, реализованной с использованием свойств трансформационной оптики	99
3.2. Исследование сферической линзы Люнеберга, состоящей из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра	108
3.2.1. Разработка конструкции сферической линзы Люнеберга	109
3.2.2. Исследование направленных и частотных характеристик сферической линзы Люнеберга	113
3.3. Сравнительный анализ конструкций сферических линз Люнеберга .	118
3.4. Выводы по третьей главе.....	123
4. Исследование и разработка многолучевой антенной системы на основе нерегулярной линзы.....	125
4.1. Проблемы построения линейных антенных решеток из электрически больших линзовых элементов.....	126
4.2. Исследование и разработка многолучевых антенных систем на основе нерегулярной линзы для мобильного терминала спутниковой связи	129
4.2.1. Методика снижения УБЛ в линейных синфазных АР, состоящих из электрически больших линзовых элементов.....	130
4.2.2. Исследование и разработка МЛА на основе нерегулярной линзы, состоящей из усеченных сферических антенн на основе однородного диэлектрика.....	131
4.2.3. Нерегулярная линза, состоящая из усеченных линз Люнеберга..	135
4.3. Исследование и разработка многолучевых антенных систем на основе нерегулярной линзы для мобильного терминала спутниковой связи	142
4.3.1. Разработка диаграммообразующего волноводного тракта.....	142
4.3.2. Разработка и исследование синфазной печатной антенной решетки с механическим управлением линейной поляризацией для мобильного терминала спутниковой связи.....	144

4.3.3. Разработка и исследование синфазной антенной решетки на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика для мобильного терминала спутниковой связи.....	150
4.3.4. Результаты измерений основных электродинамических характеристик антенной системы на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика.....	156
4.4. Выводы по четвертой главе	158
Заключение	161
Список сокращений и условных обозначений.....	163
Список литературы	164
Приложение А. Патент на изобретение	182
Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертации.....	183

Введение

Актуальность работы Многолучевые антенны (МЛА) предназначены для формирования многолепестковой диаграммы направленности (ДН) с независимыми входами/выходами для каждого из сканирующих лучей. Это позволяет значительно повысить емкость систем радиосвязи за счет увеличения количества одновременно обслуживаемых абонентов. В системах радиолокации МЛА позволяют быстро определять местоположение объектов в пространстве и отслеживать их большое число за счет большого числа высоконаправленных ДН. В настоящее время разработаны различные типы МЛА: на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР), линзовых или зеркальных антенн [1].

МЛА, созданные на основе линзовых антенн, обладают следующими достоинствами:

- возможность создания осесимметричных антенных систем без затенения;
- реализация широкоугольного сканирования в азимутальной и угломестной плоскости без существенного искажения сканирующих лучей;
- высокие значения коэффициента направленного действия (КНД) в каждом из сканирующих лучей;
- возможность создания широкополосных антенных систем.

Несмотря на свои достоинства, МЛА линзового типа имеют ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение в наземных или бортовых системах связи:

- сложность и дороговизна изготовления линзы;
- наличие диссипативных потерь в диэлектрике линзы;
- в ряде случаев линзы обладают большой массой;
- из-за отражений от тела линзы потребуются дополнительные меры для улучшения согласования антенной системы.

Благодаря прогрессу в науке и технике, в области материаловедения, появлению и развитию искусственных диэлектриков и метаматериалов, в настоящее время разработаны различные конструкции МЛА на основе линзовых антенн различных форм, обладающих небольшими массогабаритными характеристиками. Вместе с тем, важной задачей является разработка новых конструкций линзовых антенн и их технологий производства, позволяющих существенно снизить стоимость антенных систем при сохранении высоких направленных свойств.

В условиях санкций, наложенных на Россию, закупка современных радиосистем различного назначения и их технологий производства существенно затруднена. Поэтому существует актуальная проблема импортозамещения, связанная с необходимостью разработки отечественных систем радиосвязи различного назначения, в том числе, и с разработкой МЛА линзового типа.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие теории и техники, методологии проектирования МЛА линзового типа внесли многие как отечественные ученые и инженеры: В.П. Акимов, Д.И. Воскресенский, Е.Г. Зелкин, В.А. Калошин, Б.А. Панченко, Ю.Г. Пастернак, Ю.П. Саломатов, С.Н. Шабунин, А.В. Шишлов, так и зарубежные: R.C. Hansen, W.E. Kock, N. Kundtz, R.K. Luneburg, S. Matitsine, L. Matytsine, D. McGrath, J.B. Pendry, D. Popovic, D.M. Pozar, C.M. Rappaport, W. Rotman, J. Ruze, K. Wu.

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

- исследование влияние дисперсии и анизотропии метаматериалов на направленные и частотные характеристики антенных систем;
- разработка метаматериалов, обладающих минимальной дисперсией;
- разработка широкополосных линзовых антенн для широкоугольного сканирования, в том числе, и с использованием свойств трансформационной оптики;

– создание антенных систем, обеспечивающих развязку по поляризации: антенная система имеет поляризацию, отличную от поляризации облучателя линзы;

– разработка синфазных антенных решеток (АР) на основе линзовых антенн, имеющих низкий уровень боковых лепестков (УБЛ) и высокие значения КНД.

Объектом исследования являются МЛА линзового типа.

Предметом исследования являются технологии, способы и методики разработки, проектирования линзовых антенн, а также их электродинамические характеристики.

Цель и задачи исследования.

Цель – разработка моделей, методик проектирования и исследование электродинамических характеристик линзовых МЛА.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

– анализа современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства линзовых МЛА;

– исследования влияния дисперсии и анизотропии печатных метаматериалов на направленные и частотные характеристики цилиндрических линзовых антенн (изотропная линза, цилиндрические линзы Люнеберга);

– разработка методик, позволяющих уменьшить анизотропию в метаматериалах, и создание сферических и полусферических линзовых антенн на их основе;

– разработка и исследование двухкоординатной многолучевой антенной системы на основе печатной линзы с возможностью развязки по поляризации;

– исследование возможности построения широкополосной МЛА на основе трехмерно-трансформированной линзы Люнеберга;

– разработка методики для уменьшения УБЛ в линейных синфазных АР, состоящих из электрически больших линзовых антенн.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– разработана методика проектирования метаматериальных линзовых антенн, созданных на основе параллельных печатных плат (цилиндрические, полусферические, сферические), отличающаяся учетом влиянием дисперсии и анизотропии метаматериалов;

– разработана методика проектирования сферических линз Люнеберга, реализуемых при помощи технологий трехмерной печати или станка с числовым программным управлением, отличающаяся минимизацией анизотропии ячейки периодической структуры в виде цилиндрических отверстий в диэлектрике за счет усреднения эффективных проницаемостей по двум поляризациям (параллельная и перпендикулярная оси воздушного отверстия);

– разработана модель многолучевой антенны на основе многослойной печатной платы, отличающаяся развязкой по поляризации между облучателями и антенной – облучатели линзы имеют линейную поляризацию, а антенная система – круговую;

– разработана методика проектирования линейных синфазных антенных решеток, состоящих их электрически больших линзовых излучателей (диаметром более восьми длин волн), в отличие от известных, позволяющая снизить уровень боковых лепестков до величины $-13,2$ дБ, за счет выравнивания амплитудного распределения поля в раскрыве антенны, которое достигается благодаря использованию усеченных линзовых элементов, расположенных на одной оси и объединенных в один массив (нерегулярная линза);

– разработана модель антенной решетки на двух ортогональных поляризациях на основе нерегулярной линзы, отличающаяся использованием технологии производства многослойных печатных плат.

Теоретическая значимость работы заключается в создании методов синтеза и анализа периодических структур, линзовых антенн, АР из

электрически больших линзовых антенн, а также в исследовании электродинамических характеристик МЛА линзового типа.

Практическая значимость работы. Полученные результаты исследований электродинамических характеристик линзовых антенн, а также разработанные методики, позволяющие минимизировать анизотропию в метаматериалах, позволят создавать широкополосные линзовые антенны на основе периодических структур. Разработаны новые конструкции антенн для мобильных терминалов спутниковой связи на основе нерегулярной линзы, позволяющие создавать как МЛА, так и синфазные АР, обладающих высокими направленными свойствами. По результатам диссертационного исследования получен патент на изобретение №2765570 «Нерегулярная линза и многолучевая антенная система с двумя ортогональными поляризациями на ее основе».

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использовались методы анализа и синтеза периодических структур, антенн, математические методы технической электродинамики, стандартные методики натурных измерений электродинамических характеристик антенн.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанная методика позволяет учитывать влияние дисперсии и минимизировать анизотропию печатных метаматериалов, что делает возможным реализацию широкополосных метаматериальных линзовых антенн различных типов и конструкций, созданных на основе параллельных печатных плат;

– минимизация анизотропии периодической структуры, в виде цилиндрических отверстий в диэлектрике, за счет усреднения эффективных проницаемостей, рассчитанных для двух поляризаций (параллельная и перпендикулярная оси воздушного отверстия) позволяет создавать широкополосную сферическую линзу Люнеберга;

– разработана модель МЛА на основе многослойной печатной платы, отличающаяся развязкой по поляризации между облучателями и антенной –

облучатели линзы имеют линейную поляризацию, а антенная система круговую;

– теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что синфазные АР, состоящие из усеченных электрически больших линзовых элементов (нерегулярная линза), имеют УБЛ, близкий к величине -13,2 дБ (УБЛ синфазного равноамплитудного раскрыва);

– использование технологий производства многослойных печатных плат позволяет создавать АР на основе нерегулярной линзы удобные для размещения на борту транспортных средств с существенно меньшей массой, по сравнению с нерегулярными линзами на основе сферических антенн.

Степень достоверности полученных в работе результатов обусловлена применением известных методов синтеза и анализа периодических структур, антенн, а также корректным использованием методов математического моделирования и вычислительных методов технической электродинамики. Полученные результаты не противоречат фундаментальным законам физики, теории и техники антенн, электродинамики, а также ранее описанным в литературе исследованиям других авторов. Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось с использованием фундаментальных законов электродинамики, теории и техники антенн. Экспериментальные данные получены в научно-производственном предприятии «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) с использованием стандартных методик измерения характеристик и параметров антенн. Результаты экспериментов подтвердили достоверность численного электродинамического моделирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXVI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2020); XVIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов-2020» (г. Самара, 2020); XVIII

Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (г. Ижевск, 2022); 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2022).

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены в виде методик проектирования линзовых антенн в научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж). Также результаты работы внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ» в дисциплину «Устройства СВЧ и антенны».

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

В работах [35, 63, 112] автором проведен анализ перспективных направлений проектирования антенн с использованием метаматериалов, а также проанализированы различные тенденции развития теории, техники и технологии производства линзовых МЛА. В [127] исследованы электродинамические характеристики цилиндрической метаматериальной линзы, состоящей из параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями. В работах [132-134] исследовано влияние дисперсии метаматериалов на электродинамические характеристики цилиндрических линз Люнеберга. В работах [135-137] разработана методика, позволяющая минимизировать анизотропию в печатных метаматериалах за счет использования впаянных поперечных металлических штырей, а также исследована сверхширокополосная МЛА на основе полусферической метаматериальной линзы. В работе [140] разработана двухкоординатная МЛА на основе печатной линзы. В работе [139] разработана и исследована небольшая линза Люнеберга (диаметр линз не превышает двух длин волн) на основе печатных плат с электрически малыми рассеивателями. В работах [145, 146] исследованы направленные и частотные характеристики в широкой полосе трехмерно трансформированной линзы Люнеберга. В работе [147]

разработана методика расчета эффективной диэлектрической проницаемости периодической структуры в виде отверстий в диэлектрике, позволяющая минимизировать анизотропию за счет ее усреднения, а также исследована сферическая линза Люнеберга на основе перфорированных диэлектрических дисков. В работе [148] проведен сравнительный анализ характеристик нескольких конструкций сферических линз Люнеберга. В работах [149-152] разработана методика, позволяющая снизить УБЛ и повысить КНД в АР, состоящих из электрически больших линзовых излучателей, с использованием новой запатентованной конструкции линзовой антенны – нерегулярной линзы.

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

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 научных работах, из них 13 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 работ опубликованы в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 152 наименований и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 185 страницах, содержит 139 рисунков и 2 таблицы.

1. Анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства многолучевых линзовых антенных систем

1.1 Анализ современных подходов к созданию линзовых МЛА на основе линз из однородных диэлектриков и апланатических линз

1.1.1 Линзы из однородных диэлектриков

Один из самых простых подходов к созданию МЛА линзовых антенн заключается в использовании сферических линз или полусферических (для формирования большого числа ДН в азимутальной и угломестной плоскости), цилиндрических линз (для формирования большого числа ДН в азимутальной плоскости) из однородных диэлектриков. Основные расчетные соотношения для расчета коэффициента преломления приведены в [2]. В [3-4] описана возможность использования сферической линзы в МЛА. На рисунке 1.1. показан внешний вид МЛА антенной системы на основе сферической линзы.

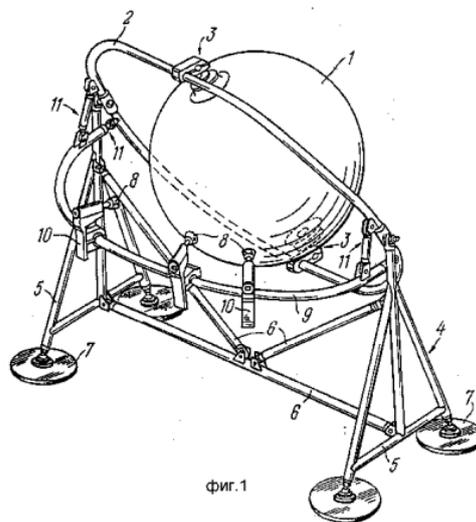


Рис. 1.1. Линзовая МЛА на основе сферической линзы центральной симметрии

В работе [5] описана возможность использования цилиндрических линз для реализации МЛА с частотно-независимыми характеристиками излучения в широкой полосе. В работах [6-7] описана конструкция азимутальной МЛА

на основе цилиндрической линзы, помещенной между двумя параллельными металлическими пластинами (рисунок 1.2).

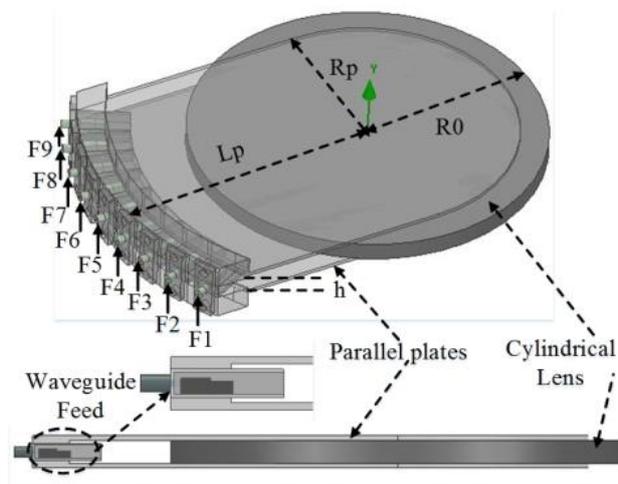


Рис. 1.2. Линзовая МЛА на основе цилиндрической линзы, помещенной между двумя параллельными металлическими пластинами

Основной недостаток использования цилиндрических линзовых антенн связан с ограниченностью азимутального сектора сканирования одной цилиндрической линзы. Возможность использования цилиндрических линзовых антенн для создания МЛА с полноазимутальным сектором сканирования описана в патенте [8]. Для этого предложено расположить соосно линзовые элементы, но с небольшим зазором между соседними линзами (шириною примерно с кабель). Это позволяет проложить питающие кабели между парой цилиндрических линз, тем самым обеспечивая сектор сканирования в 360° .

Полусферические линзы позволяют реализовывать как полноазимутальные МЛА, так и МЛА с возможностью сканирования в азимутальной и угломестной плоскости одновременно. В [9, 10] показана возможность использования полусферической линзы для систем спутниковой связи. Для обеспечения сканирования в угломестной плоскости основание полусферической линзы устанавливается на металлическую поверхность (плоскость заземления). Сферический фронт волны от облучателя,

проходящий через линзу, отражается на металлической поверхности. В зависимости от угла расположения облучателей, плоская волна, образованная сферической линзой, выходит под разными углами относительно нормали к поверхности (рисунок 1.3).

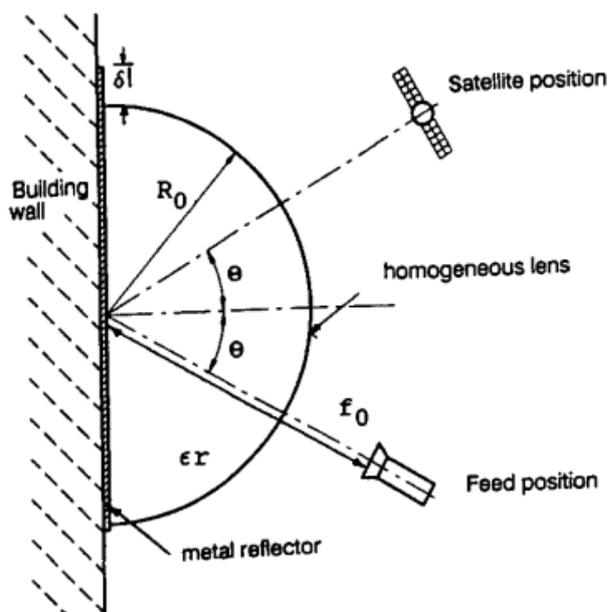


Рис. 1.3. Применение полусферической линзы для реализации МЛА с возможностью сканирования в двух плоскостях

Простота конструкции полусферической антенны позволяет ее использовать в различных частотных диапазонах. В [11] показана возможность создания антенной решетки для полноазимутального сканирования на основе полусферической линзы из гранитного щебня. Описанная МЛА позволяет одновременно формировать несколько десятков лучей ДН в длинноволновой области УКВ-диапазона волн.

Основные недостатки использования сферических и цилиндрических линз из однородных диэлектриков связаны с большими габаритами и массой линз.

В тех случаях, когда требуется малый угол сканирования (например, $\pm 5^\circ$ или $\pm 10^\circ$ градусов), в качестве линзы для МЛА можно использовать линзы с одной преломляющей поверхностью или линзы Френеля.

Коэффициент преломления (n) тела линзы с одной преломляющей поверхностью может быть, как больше единицы, так и меньше единицы. При $n > 1$ линзы называются замедляющими, а при $n < 1$ – ускоряющими. На рисунке 1.4. схематично изображены профили ускоряющей и замедляющей линз с одной преломляющей поверхностью [2].

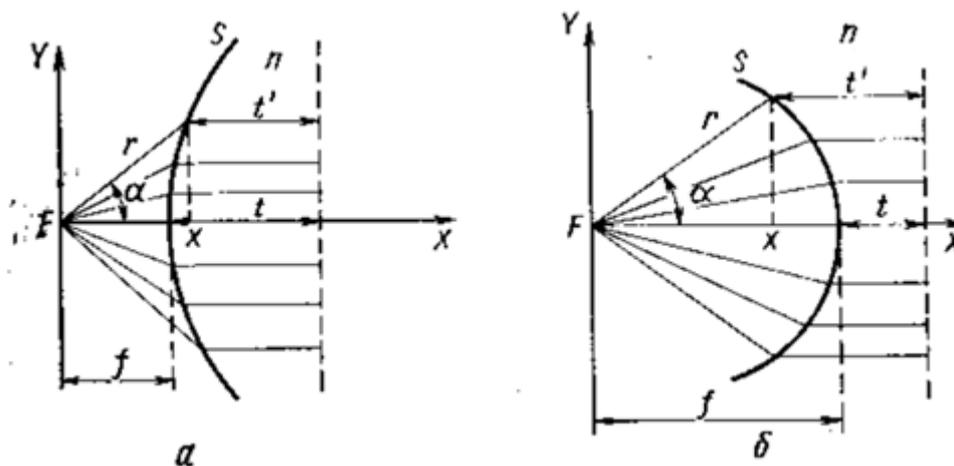


Рис. 1.4. Профили замедляющей линзы (а) и ускоряющей линзы (б)

Условие равенства длины оптического пути для центрального и любого другого луча, выходящего из фокуса (F) записывается в виде [2]:

$$f + tn = r + t'n \quad (1.1)$$

где: f – величина фокусного расстояния; t – толщина линзы в центре; t' – толщина линзы в произвольной точке; r – расстояние от фокуса до преломляющей поверхности линзы.

Соотношение (1.1) при $n > 1$ описывает гиперболоид вращения (рисунок 1.4(а)), а при $n < 1$ – эллипсоид вращения (рисунок 1.4(б)).

Для технической реализации ускоряющих линз используют параллельные металлические пластины, плоские волноводы и обычные волноводы прямоугольного сечения (в литературе такие линзы называют волноводными или металлопластинчатыми линзами). Стоит отметить, что первые работы по разработке линзовых антенн на основе параллельных металлических пластин появились в середине XX благодаря исследованиям Уинстона Е. Кока. В своих работах [12, 13] он описал принципы построения

антенных систем, полосу их пропускания и другие важные характеристики линзовых антенн.

Коэффициент преломления среды из двух металлических пластин, расположенных параллельно вектору электрического поля, описывается выражением [12]:

$$n = \sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2} < 1 \quad (1.2)$$

где: λ – длина волны свободного пространства; a – расстояние между металлическими пластинами (или стенками волновода).

Изменяя расстояние между пластинами (или стенками волновода) можно подобрать требуемый n для определенной частоты в широких пределах. Основной недостаток металлопластинчатых линз связан с узкополосностью, поскольку n зависит длины волны. На рисунке. 1.5 показан внешний вид металлопластинчатых линз [14].

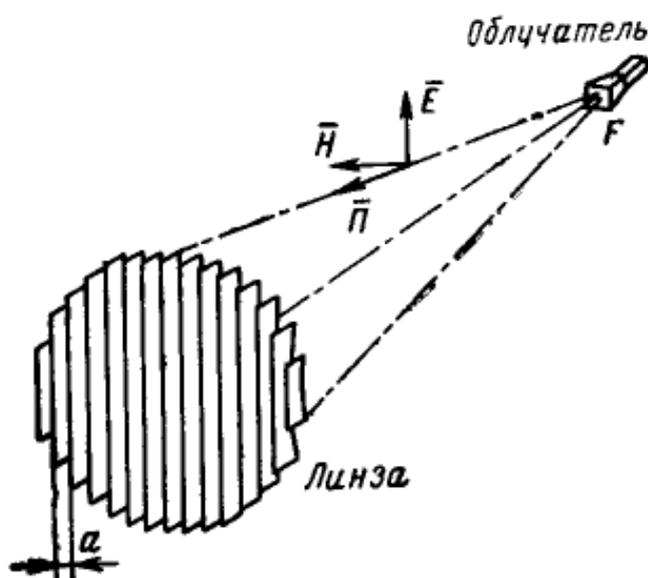


Рис. 1.5. Металлопластинчатая линза

Подробное описание, а также расчетные соотношения для линзовых антенн с одной преломляющей поверхностью содержится в [2, 12, 13].

В отличие от линз с одной преломляющей поверхностью, преобразование сферического фронта волны источника в плоский в линзе

Френелля достигается не за счет изменения профиля линзы, а благодаря разбиению тела линзы на участки с разными коэффициентами преломления. На рисунке 1.6 схематично показана плоская фазово-корректирующая линза Френелля [15].

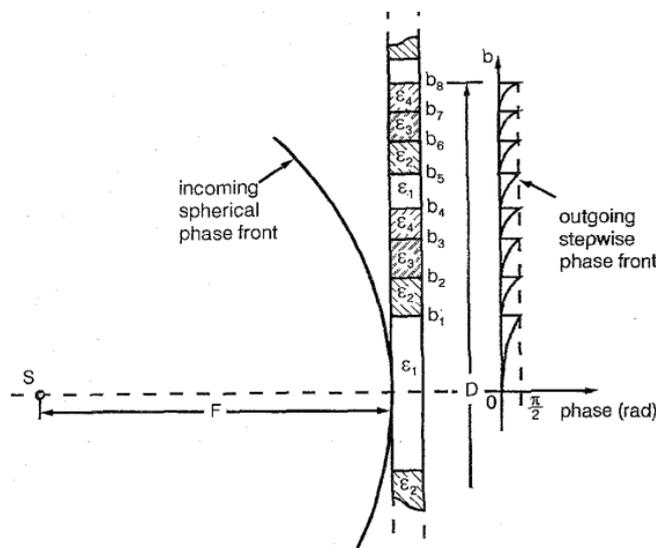


Рис. 1.6. Плоская фазово-корректирующая линза Френелля [15]

Подробное антенных систем на основе зонированной линзы Френелля приведено в [15-18].

1.1.2. Апланатические линзы

Чтобы при больших смещения облучателя из точки фокуса по некоторой кривой сохранить форму ДН, необходимо устранить оптическую кому и сферическую aberrацию. Для этого используют линзы специального профиля, названные по аналогии с оптическими линзами такого рода – апланатическими. Апланатические линзы характеризуются тем, что форма их поверхностей удовлетворяет следующим требованиям [2, 19]:

– профиль облучаемой стороны линзы рассчитывают таким образом, чтобы выполнялось условие синусов Аббе (данное требование позволяет устранить кому);

– профиль теневой стороны линзы должен удовлетворять условию синфазности в раскрыве линзы при нахождении облучателя в фокусе (данное требование позволяет минимизировать сферическую aberrацию).

Основными типами апланатических линз являются [2]:

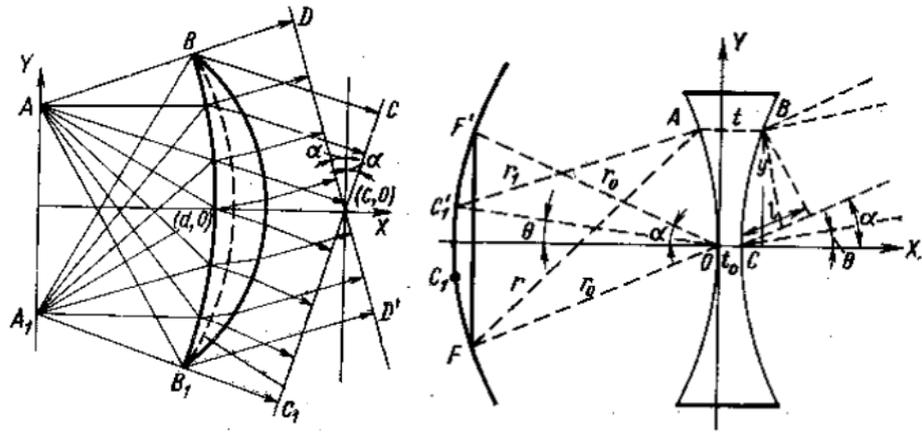
– широкоугольные апланты из однородного диэлектрика, у которых при перемещении облучателя из фокуса отклоняется ДН, при этом искажения формы ДН тем меньше, чем меньше угол отклонения;

– бифокальные линзы, у которых обеспечивается неискаженная ДН при помещении облучателя в двух точках (являющиеся фокусами), расположенных симметрично относительно оси симметрии линзы;

– линзы с тремя точками фокусировки (линзы Ротмана).

Расчетные соотношения для расчета профиля апланатических линз приведены в [2]. В работе [20] описана методика проектирования линзовой МЛА на основе диэлектрической апланатической линзы, облучаемой с помощью плавных переходов экспоненциальной формы. Основные недостатки данной конструкции связаны с искажением формы ДН, увеличением УБЛ, а также падением коэффициента усиления (КУ) при отклонениях луча ДН.

Наличие двух преломляющих поверхностей, а также двух точек идеальной фокусировки позволяет реализовывать на основе бифокальных линз МЛА, в которых, при существенном отклонении луча, несильно скажется форма ДН. Бифокальные линзы, также, как и линзы с одной преломляющей поверхностью, могут быть замедляющими (диэлектрические бифокальные линзы) или ускоряющими (металлопластинчатые бифокальные линзы). На рисунке 1.7 показаны профили диэлектрической и металлопластинчатой бифокальных линз [2].



а) диэлектрическая линза

б) металлопластинчатая линза

Рис. 1.7. Схематичное изображение профилей бифокальных линз

Задача расчета бифокальных линз сводится к определению формы теневой и облучаемой поверхности линзы по заданным исходным параметрам: координаты расположения двух фокусов, максимальный угол отклонения луча относительно центральной оси, величина n . Для диэлектрических бифокальных линз не существует точно решения для определения формы поверхностей линзы, однако разработан ряд методик синтеза, позволяющих получить достаточно точное приближенное решение этой задачи. Примеры таких методик содержатся в работах [2, 20-22]. Примеры использования диэлектрических бифокальных линз для построения МЛА содержатся в работах [20, 23-25]. В частности, в работах [23, 24] описана МЛА для миллиметрового диапазона с возможностью сканирования в широком секторе углов как в азимутальной, так и угломестной плоскости. Это достигается за счет использования тороидально-бифокальной линзы. Для осуществления сканирования в угломестной плоскости используется профиль бифокальной линзы. А для широкоугольного сканирования в азимутальной плоскости тело линзы определяется путем вращения вокруг вертикальной оси, проходящей вблизи облучателя, и имеет форму тороида. В качестве облучателя используется фазированные антенные решетки (ФАР). На рисунке 1.8 показан внешний вид тороидально-бифокальной линзы.

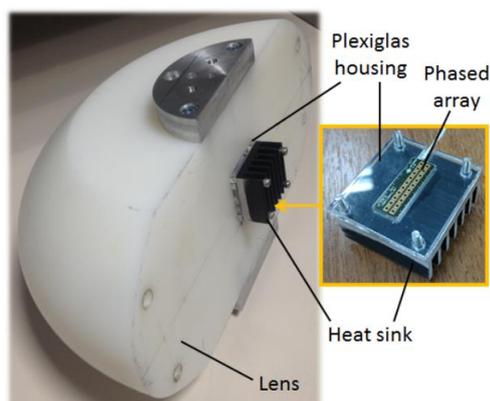


Рис. 1.8. Тороидально-бифокальная линза

Расчет металлопластинчатых бифокальных линз выполняется значительно проще, поскольку пути лучей заранее известны и определяются не законом преломления, а положениям пластин линз [2]. Данный метод расчета был предложен Рузом в середине XX века для расчета профилей цилиндрических бифокальных линз. В своей работе [26] он описал условия преобразования цилиндрической волны в плоскую (рисунок 1.7(б)) для различных профилей линз и используемых в них законах преломления, а также оптимальные кривые перемещения облучателей и величины фазовых ошибок. В работе [27] показана возможность построения линзовой МЛА с возможностью сканирования в двух плоскостях на основе волноводной бифокальной линзы для систем спутниковой связи. На рисунке 1.9 показан внешний вид экспериментальной линзовой МЛА [27].

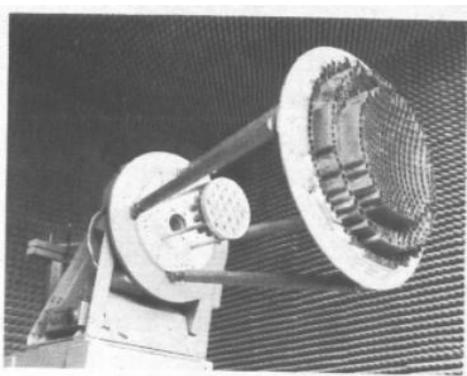


Рис. 1.9. МЛА на основе волноводной бифокальной линзы

Основные недостатки бифокальных линз связаны с изогнутостью их обеих поверхностей, что накладывает определенные ограничения на их практическое применение. Если же в таких линзах сделать плоской теневую поверхность, то возникнут aberrации и комы высших порядков [28]. В работе [28] показана возможность уменьшения aberrаций и ком высших порядков в линзах с плоским раскрывом за счет использования линз с тремя идеальными точками фокусировки. Для реализации трех идеальных точек фокусировки вводится еще одна степень свободы – ординаты точек входа и выхода лучей в линзе не зависят друг от друга. Благодаря дополнительной степени свободы получаются четыре независимых условия, однозначно определяющие геометрию линзы: две точки идеальной фокусировки, смещенные относительно оси, одна точка идеальной фокусировки на оси, плоская поверхность линзы. [2]. Такие линзы чаще всего называют по имени своего автора – линзы Ротмана. Подробное детальное описание линз Ротмана (и модификаций), подбор оптимальных геометрических параметров содержится в [28-30]. Схематичное изображение линзы Ротмана приведено на рисунке 1.10.

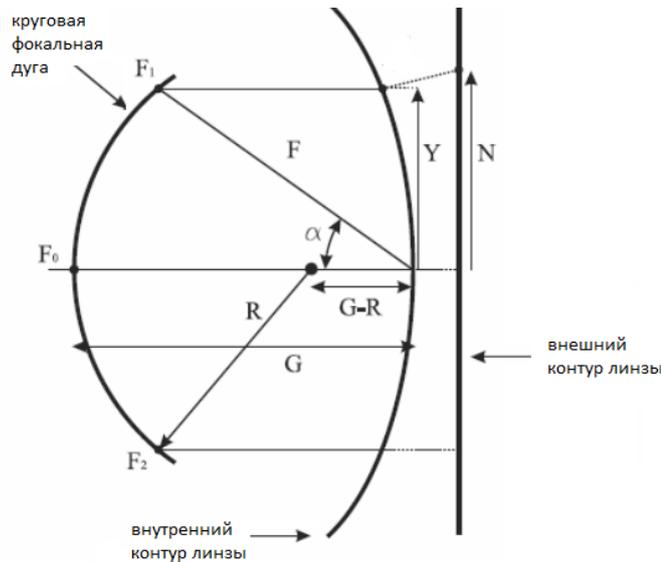


Рис. 1.10. Схематичное изображение линзы Ротмана

Техническая реализация линзы Ротмана возможна на основе металлопластинчатой СВЧ-линзы с применением гибких коаксиальных

кабелей [28]. Однако большинство современных линз Ротмана выполняют в микрополосковом исполнении, что позволяет обеспечить низкую стоимость производства и малый вес [30].

В настоящее время линзы Ротмана широко используются в азимутальных МЛА линзового типа [30-32]. Однако линзы Ротмана могут быть использованы и для построения МЛА, позволяющих осуществлять сканирование в двух плоскостях. Примером такой антенной системы является металлическая волноводная линзовая антенна, описанная в работе [33].

1.2. Линзы Люнеберга

Из многочисленных конструкций линзовых МЛА выделяются сферически или цилиндрически симметричные линзы с градиентно изменяющимся показателем преломления, названные в честь своего автора – линзы Люнеберга. Благодаря своей осесимметричной конструкции, они позволяют формировать большое число ДН без искажений в широком секторе углов. В радиолокации линзы Люнеберга используют в качестве радиолокационного отражателя (рефлектор Люнеберга) [34]. Для создания отражающего слоя поверхность линзы частично металлизуют [35].

Классическая линза Люнеберга представляет собой диэлектрическую сферу с радиально изменяющимся показателем преломления, у которой фокус расположен на поверхности. Это достигается за счет изменения показателя преломления по закону [2]:

$$n = \sqrt{2 - (r/R)^2}, \quad (1.3)$$

где: R – радиус линзы; r – текущий радиус внутри сферы.

Если необходимо расположить фокус вне линзы, учесть влияние оболочки, то для расчета коэффициента преломления необходимо использовать общее решение для линзы Люнеберга единичного радиуса, которое учитывает наличие оболочки [2]:

$$n(\rho) = \frac{1}{a} e^{q(\rho, F) - Q(\rho)}, \quad (1.4)$$

$$Q(\rho) = \frac{2}{\pi} \int_{r_{ob}}^1 \arctan\left(\sqrt{\frac{1-\rho^2}{P(R)^2-1}}\right) \frac{dR}{R}, \quad (1.5)$$

$$P(R) = n_{ob} R, \quad (1.6)$$

$$q(\rho, r_{ob}) = \frac{1}{\pi} \int_{\rho}^1 \frac{\arcsin(t/r_{ob})}{\sqrt{t^2-\rho^2}} dt, \quad (1.7)$$

$$\arcsin\left(\frac{1}{F}\right) \geq \int_{r_{ob}}^1 \frac{dR}{R\sqrt{P(R)^2-1}}, \quad (1.8)$$

где: F – фокусное расстояние; r_{ob} – радиус линзы под оболочкой; n_{ob} – коэффициент преломления оболочки.

На рисунке 1.11 показаны кривые зависимости n , построенные согласно (1.4)-(1.8), для различных линз, имеющих одинаковое значение фокусного расстояния ($F = 1,1$). Кривая 1 соответствует линзе без внешнего слоя (оболочки), кривая 2 – линзе с однородным внешним слоем ($r_{ob} = 0,8696$ и $n_{ob} = 1,15$), кривая 3 – линзе с линейно-зависимым от радиальной координаты внешним слоем ($r_{ob} = 0,7906$ и $n_{ob} = 1,6r$).

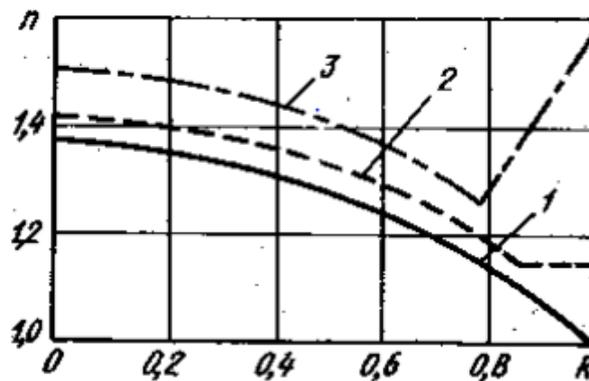


Рис. 1.11. Различные законы изменения коэффициента преломления в линзе Лüneберга с вынесенным фокусом:

- 1 – линза без оболочки; 2 – линза с однородным внешним слоем; кривая 3 – линза с неоднородным внешним слоем [2].

Анализ кривых зависимости n , а также соотношений (1.3)-(1.8) показывает [2]:

- с увеличением фокусного расстояния уменьшается значение n в центре линзы;
- наличие внешней оболочки приводит к увеличению значений n в центре линзы;
- при внешнем слое с $n_{ob} = 1,6r$ линза не имеет максимального значения n в центре линзы.

Подробное описание влияния оболочки, а также аналитический вывод соотношений (1.3)-(1.8) содержится в [2].

На практике часто применяются цилиндрические линзы Люнеберга, фокусирующие плоскую падающую волну в фокальной линии на противоположной стороне линзы. В случае этом случае: R – радиус цилиндра, а r – расстояние до оси цилиндра линзы. При большом диаметре линзы Люнеберга перемещение облучателя по ее поверхности может создать значительные конструктивные трудности. В этом случае используется модифицированная линза Люнеберга, у которой фокус расположен внутри линзы на окружности значительного меньшего радиуса, чем радиус линзы. Реализация сферической модифицированной линзы Люнеберга вызывает значительные конструктивные трудности, поэтому ее выполняют цилиндрической. А из-за расположения облучателя внутри линзы, где коэффициент преломления заведомо больше единицы, потребуются специальные меры для улучшения согласования антенной системы [14, 35].

В реальных условиях практически невозможно точно реализовать закон изменения n , описываемый соотношениями (1.3)-(1.8). Поэтому при технической реализации структуру линзы разбивают на слои с заданными значениями коэффициента преломления – дискретизируют непрерывный закон изменения (1.3)-(1.8). В настоящее время разработаны способы дискретизации: с равным шагом по радиальной координате или по коэффициенту преломления; оптимизированный [36]. В работах [36-38]

описано влияние способа дискретизации на характеристики антенной системы.

Стоит отметить, что большее число слоев при дискретизации позволяет точнее приблизиться к непрерывному закону изменения n . Однако, в ряде случаев, это может усложнить техническую реализацию линзы. Для определения оптимального числа слоев при разбиении, в работах [36-38] рассмотрено влияние количества слоев на характеристики антенной системы. Установлено, что использование больше 6-8 слоев нецелесообразно, поскольку при дальнейшем их увеличении не наблюдается значительного улучшения направленных характеристик, однако, в ряде случаев, возрастает сложность изготовления.

Один из известных способов технической реализации линз Лüneберга – использование набора сферических (рисунок 1.12(а)) или цилиндрических оболочек (рисунок 1.12(б)) с разными n [39, 40].

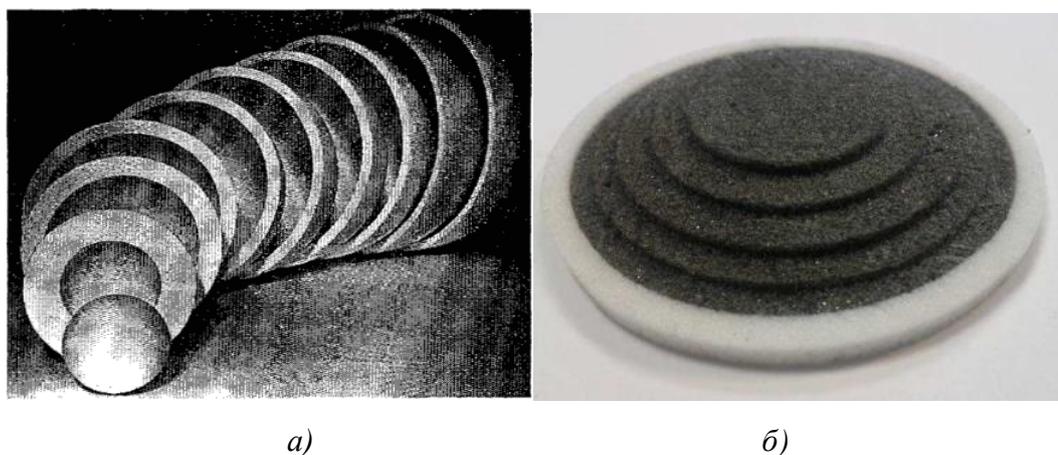


Рис. 1.12. Техническая реализация линз Лüneберга на основе: а) сферических оболочек; б) цилиндрических оболочек

В качестве материала используют вспененные диэлектрические материалы, показатель преломления которых зависит от плотности, например, пенополистирол, пенопласт [14, 39, 40].

Применяются различные диэлектрические композитные материалы с хорошими технологическими свойствами. Такие материалы состоят из синтетического полимера и диэлектрического вещества, например, соли щелочноземельных металлов, керамические порошки. Композитные материалы имеют небольшой вес и хорошие диэлектрические свойства. Поэтому их использование позволяет создавать различные конструкции линзы Люнеберга [41].

Технология изготовления линзы Люнеберга из набора сферических или цилиндрических оболочек с разными коэффициентами преломления имеет ряд определенных недостатков: сложность изготовления как материала для каждой оболочки, так и самих оболочек, необходимость точного совмещения оболочек друг с другом, высокая стоимость, потери, в некоторых случаях большая масса.

Существуют и другие способы изготовления линзы Люнеберга с использованием однородных диэлектриков. Один из возможных способов реализации цилиндрической линзы – реализация линзы в виде двух металлических пластин, заполненных диэлектриком [39, 42]. Изменение коэффициента преломления в линзе Люнеберга достигается за счет изменения расстояния между металлическими пластинами, а возбуждается такая линза волноводом с волной типа H_{10} . На рисунке 1.13 схематически показано продольное сечение.

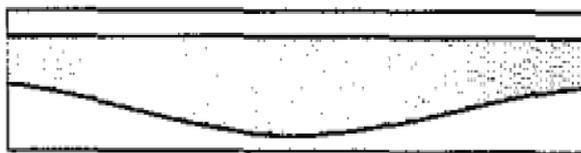


Рис. 1.13. Продольное сечение линзы Люнеберга, состоящей из двух металлических пластин, заполненных диэлектриком

В работе [43] описана антенная система на основе двух параллельных металлических пластин, заполненных диэлектриком, высота которого

непрерывно уменьшается от центра к краю для реализации требуемого n согласно (1.3)-(1.8). На рисунке 1.14(а) показан внешний вид линзы Лüneберга из диэлектрика переменной толщины. В [44] описана конструкция цилиндрической линзы Лüneберга, выполненной в виде набора коаксиальных цилиндров одной высоты, установленных с кольцевыми зазорами друг по отношению к другу (рисунке 1.14(б)). Толщина стенок и величина зазора между цилиндрами подбираются в соответствии с (1.3)-(1.8) [44]. В патенте [45] описана конструкция сферической линзы Лüneберга, изготовленной с использованием коаксиального набора параллельных круглых осесимметричных диэлектрических дисков, диаметр и толщина которых подобраны для выполнения закона (1.3)-(1.8). Внешний вид такой сферической линзы Лüneберга показан на рисунке 1.14(в)) [45].

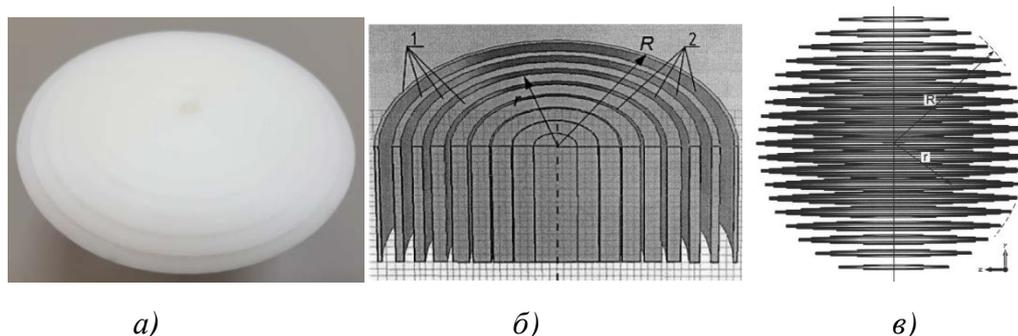


Рис. 1.14. Линзы Лüneберга из однородного диэлектрика: а) переменной толщины; б) из коаксиальных цилиндров с кольцевыми зазорами; в) диэлектрических дисков переменной толщины

Недостатки технологии изготовления линз Лüneберга из однородных диэлектриков: сложность изготовления конструкции, большая масса.

В ряде случаев, когда необходимо повысить величину КНД, реализовать ДН специальной формы, используются антенны решетки из сферических линз Лüneберга. Примеры антенных систем, построенных на основе линейных, плоских и конформных подрешеток из линзовых антенн, описаны в патентах [46, 47]. Несмотря на ряд достоинств, (повышение величины КНД в каждом из

лучей, возможность реализации ДН специальной формы) в описанных антенных системах имеется существенный недостаток – достаточно высокий УБЛ, который может существенно превышать величину -13.2 дБ (величина УБЛ синфазного и равноамплитудного раскрыва), поскольку размеры антенных элементов решетки могут в 10 и более раз превышать λ . Повышение УБЛ ограничивает применение описанных антенных систем в системах связи, характеризующихся очень слабыми принимаемыми сигналами (например, мобильные терминалы спутниковой связи) из-за увеличения шумовой температуры. На рисунке 1.15 схематично показано построение антенной решетки из сферических линзовых элементов.

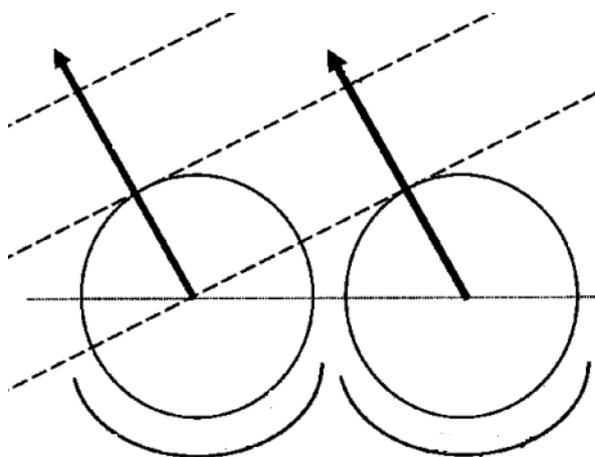


Рис. 1.15. Антенная решетка из сферических линзовых антенн

1.3. Применение искусственных диэлектриков и метаматериалов для изготовления линзовых антенн

1.3.1. Обзор первых искусственных сред и линзовых антенн на их основе

Существенные недостатки изготовления линзовых антенн из обычных однородных диэлектриков обусловлены высокой массой и заметными потерями в антенных системах. Поэтому в диапазоне СВЧ-волн для изготовления линзовых широко применяются искусственные диэлектрики,

позволяющие технически реализовать искусственную среду, обладающую высокими значениями n , малыми потерями и весом.

Первые работы по разработке искусственных диэлектриков и линзовых антенн на их основе появились в середине XX века. В [13] описан искусственный диэлектрик на основе пенопласта (пенопласт) с вкраплениями небольших металлических частиц той или иной конфигурации (например, металлические шары небольших электрических размеров), изолированных друг от друга и расположенных определенным пространственным периодом – расположены в узлах пространственной решетки. Вместо пенопласта для придания механической жесткости возможно использование тонких диэлектрических нитей (стержней). При этом диэлектрические стержни не должны влиять на значения n , а также вносить существенных потерь. Такие искусственные среды в литературе чаще называют металлодиэлектриками, а синтезированные линзы на его основе – металлодиэлектрическими. На рисунке 1.16 показан внешний вид металлодиэлектрических линз [13, 14].

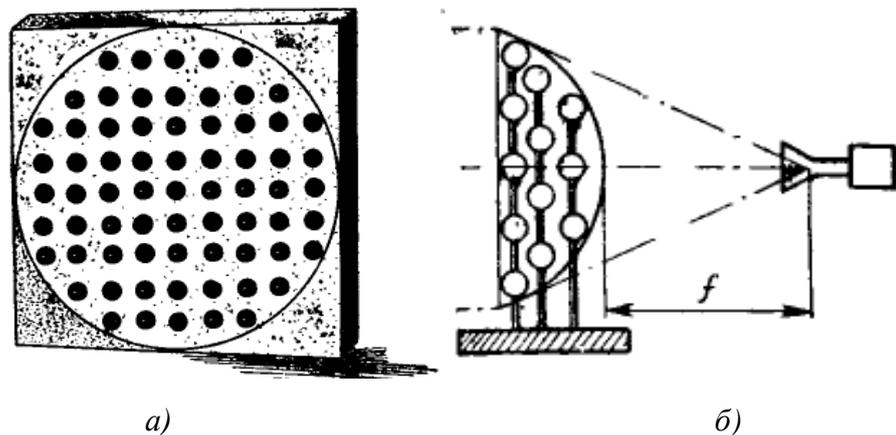


Рис. 1.16. Внешний вид металлодиэлектрических линз, изготовленных с использованием металлических шариков, пенопласта (а) или тонких диэлектрических стержней (б)

Идею создания искусственных диэлектриков такого типа можно описать следующим образом. Если во внешнее электрическое поле поместить металлические частицы небольших электрических размеров, расположенных в узлах пространственной решетки и изолированных друг от друга, то под воздействием внешнего поля электроны в этих частицах сместятся по направлению электрических силовых линий, образуя диэлектрические диполи. Моменты этих диполей противоположно направлены линиям вектора внешнего электрического поля, подобно моментам диполей молекул диэлектрика. Поэтому данную систему можно рассматривать как диэлектрик с относительной эффективной диэлектрической проницаемостью больше единицы. Основное достоинство такой искусственной среды – возможность реализации антенных систем с горизонтальной или вертикальной поляризацией [13, 14, 48]. В [49-51] описаны методики синтеза металлодиэлектриков с металлическими вкраплениями различных геометрических форм (сфера, сплюснутый сфероид, вытянутый сфероид и т.д.).

В работах [13, 51-53] описан искусственный диэлектрик на основе тонких металлических пластинок (рисунок 1.17), позволяющий реализовать линзовую антенну с линейной горизонтальной или вертикальной поляризацией.

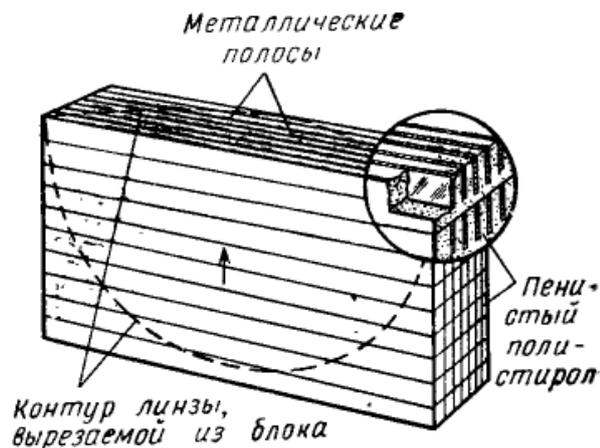


Рис. 1.17. Схематичное изображение линзы из металлических полос

В [2] описана возможность реализации линз из набора плоских или изогнутых металлических пластин. Параллельные металлические пластины, расположенные перпендикулярно вектору электрического поля, почти не влияют на электромагнитную волну, а также не изменяют ее фазовую скорость. Если же пластины расположить под некоторым углом к направлению прихода волны, то электромагнитная волна пройдет больший путь, чем в свободном пространстве. Таким образом, удастся реализовать искусственную среду с $n > 1$. Аналогично создаются линзы из волнообразно изогнутых металлических пластин. Основные достоинства таких линз: независимость n от частоты в широком диапазоне; простота конструкции; отсутствие допусков на изготовление. Основным недостатком линз из параллельных пластин связан с неравномерностью амплитудного распределения в раскрыве линзы в вертикальной плоскости. В линзах из изогнутых пластин такой недостаток отсутствует. Более подробное описание таких линз содержится в [2].

Однако использование описанных сред не позволяет реализовывать на их основе линзы с градиентно-изменяющимся n . А описанные искусственные среды, с точки зрения электродинамики, можно рассматривать в качестве однородной среды в ограниченном частотном диапазоне. Поэтому на протяжении многих лет искусственные диэлектрики не нашли такого широкого применения для изготовления линзовых антенн.

1.3.2. Метаматериалы. Сферы их применения

Метаматериалы – современные композитные материалы, электромагнитные свойства которых обусловлены искусственно созданной периодической структурой. Метаматериалы создаются при помощи внедрения в исходный материал периодической структуры из макроскопических элементов с различными геометрическими формами. В очень грубом приближении внедренные макроскопические элементы можно рассматривать как искусственно внесенные в материал атомы чрезвычайно больших

размеров, модифицирующих диэлектрическую (ϵ) и магнитную проницаемость (μ) исходного материала. Поэтому изменение геометрических параметров периодической структуры позволяет управлять параметрами среды, имитировать электромагнитные свойства известных веществ, создавать среды с электромагнитными параметрами, недостижимыми при использовании природных (обычных) материалов [54, 55].

Большой интерес к искусственным средам появился в конце XX века, после подтверждения гипотезы Виктора Веселаго. В его работах [56-58], часть из которых была опубликована еще в 60-е годы XX века, впервые теоретически дано обоснование существования сред с отрицательным n . Однако из-за отсутствия в природе таких материалов, долгое время не удавалось экспериментально подтвердить или опровергнуть данную гипотезу. В 1999 году английский физик-теоретик Джон Пендри опубликовал работу [59], в которой он дал конкретные теоретические представления и обоснования об искусственных средах с отрицательными значениями эффективного коэффициента преломления ($n_{эфф}$). В своей работе он описал периодическую структуру, состоящую из электрически малых разорванных колец, выполняющих роль магнитных диполей, и металлических проволочек. Поскольку размеры элементов периодической структуры много меньше длины волны, то свойства такой среды могут быть описаны усредненными параметрами, изменяющимися в масштабе, намного большем, чем размеры и интервал образующих материал компонентов. Поэтому такую искусственную среду, с точки зрения электродинамики, можно рассматривать в качестве однородной среды в ограниченном частотном диапазоне. В литературе такой подход еще называют гомогенизацией [55].

Практические измерения данной структуры были опубликованы в 2000 году Дэвидом Смитом вместе с коллегами из Калифорнийского университета в Сан-Диего, а позднее сама среда была запатентована [60, 61]. С этого момента значительно возрос интерес к использованию метаматериалов в различных радиотехнических задачах [55].

Техническая реализация искусственных сред на основе метаматериалов не всегда требует сложных технических решений, а созданные на их основе устройства могут иметь различные формы, обладать уникальными характеристиками, меньшим весом и габаритами по сравнению с устройствами, изготовленными с использованием традиционных материалов и технологий. Благодаря этому, метаматериалы широко применяются в различных сферах радиотехники. В частности, в [62] описаны фундаментальные основы метаматериальных селективных поверхностей, в работе [63] приведен обзор применения метаматериалов при создании электрически малых антенн, а в [64] описаны различные широкополосные метаматериальные радиотехнические устройства.

Более подробный обзор применения метаматериалов в различных радиотехнических сферах содержится в обзорных работах [54, 55].

1.3.3. Применение метаматериалов для создания многолучевых линзовых антенн

Распространенный способ создания искусственной среды с заданным законом изменения эффективной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_{эфф}$) – использование в качестве ячейки периодической структуры метаматериала диэлектрик с частичным воздушным заполнением.

Один из самых распространенных способов технической реализации – использование перфорированного диэлектрика. В патенте [65] описана конструкция объемной сферической линзы Лüneберга, в которой для достижения требуемого закона изменения коэффициента преломления (1.3)-(1.8) используются радиальные отверстия, диаметр которых изменяется в зависимости от текущей радиальной координаты в линзе (рисунок 1.18(а)).

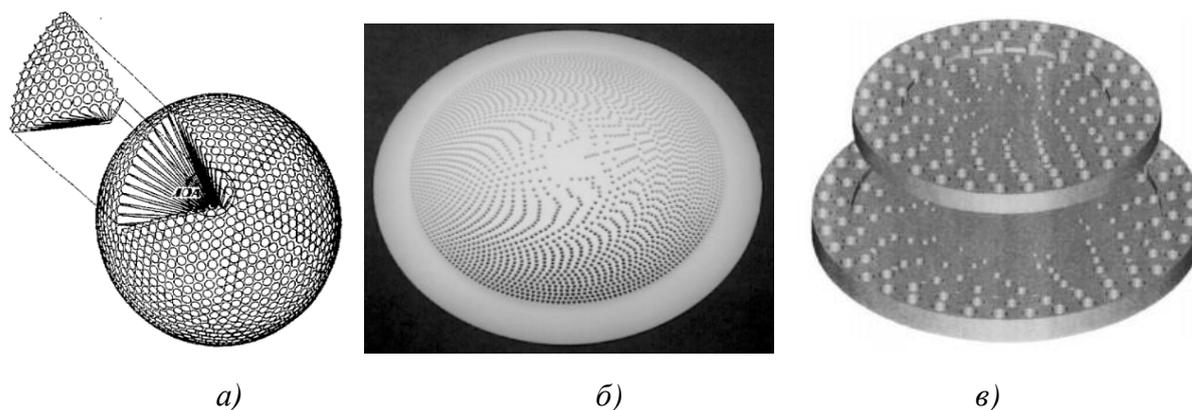


Рис. 1.18. Использование перфорированного диэлектрика: а) сферическая ЛЛ на основе радиально перфорированного диэлектрика; б) перфорированный цилиндр; в) сферическая ЛЛ на основе соосных перфорированных цилиндров

В работах [43, 66] описана цилиндрическая ЛЛ из перфорированного диэлектрика (рисунок 1.18(б)). Стоит отметить, что возможно использовать не только цилиндрические отверстия, но и секторальные [67]. В [68] описана ЛЛ, состоящая из набора соосных цилиндров переменного радиуса (рисунок 1.18(в)), в каждом из которых проделаны отверстия различного диаметра для реализации закона (1.3)-(1.8). Основное достоинство использования перфорированных диэлектриков связано с отсутствием каких-либо металлических элементов в периодической структуре, что позволяет реализовывать широкополосные антенные системы. Основным недостатком данной технологии изготовления является подбор сверл нужного диаметра. Реализация сферической линзы Лüneберга с использованием сверления является сложной задачей в технологическом плане.

Использование технологии трехмерной печати позволяет создавать предметы или устройства со сложной геометрией. Данная технология применяется для изготовления различных радиотехнических устройств, обладающих сложной конструкцией для изготовления с использованием традиционных способов производства. В [69-73] описаны сферические линзы Лüneберга, изготовленные с использованием различных технологий трехмерной печати. На рисунке 1.19(а) показана напечатанная сферическая

линза, состоящая из радиальных отверстий [69], а на рисунке 1.19(б) – сферическая линза Люнеберга, периодическая структура которой выполнена в виде диэлектрических кубиков разного размера [70, 73]. Недостатки использования технологий трехмерной печати: ограниченность габаритов печатного изделия, достаточно высокая стоимость оборудования и материалов.

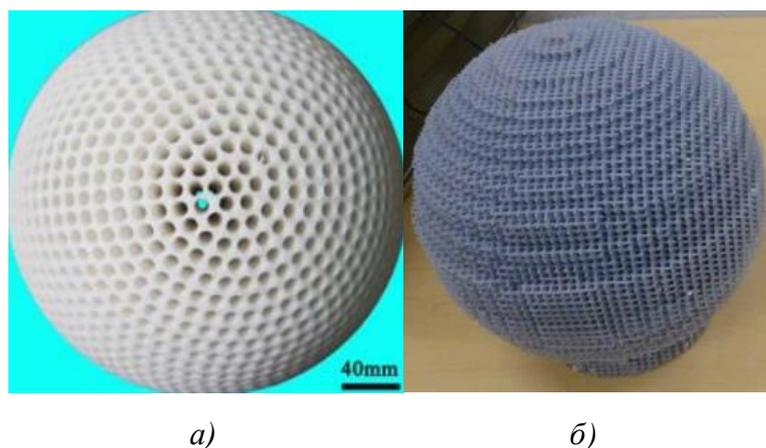


Рис. 1.19. Реализация линзы Люнеберга с применением технологии трехмерной печати: а) на основе радиальных отверстий; б) использование диэлектрических кубиков разного размера

В работе [74] описана цилиндрическая линза Люнеберга, состоящая из радиально расположенных диэлектрических лепестков, изменение толщины которых позволяет управлять значениями $\varepsilon_{эфф}$ для выполнения необходимого закона (рисунок 1.20(а)). Схожая конструкция описана в работе [75], где для создания сферической линзы Люнеберга используются радиально расположенные диэлектрические стержни переменной толщины с субволновой периодичностью (рисунок 1.20(б)). Недостатком данного способа изготовления является сложность конструкции.

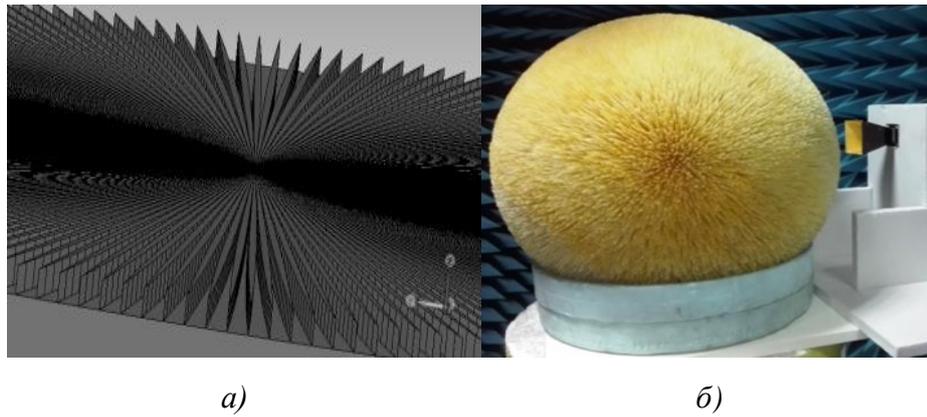


Рис. 1.20. Реализация линзы Лüneберга из: а) диэлектрических лепестков; б) диэлектрических стержней

Использование печатных плат позволяет создавать метаструктуры самых разнообразных форм. Благодаря простоте и точности изготовления, большому ассортименту печатных плат с разной толщиной диэлектрика подложки и металлизации, печатные платы широко используются для создания планарных [76-80] или цилиндрических [81] линз Лüneберга.

Основные недостатки данной технологии изготовления связаны с наличием дисперсии и анизотропии печатных метаструктур (из-за планарной несимметричной конструкции). Наличие анизотропии препятствует созданию сферических линзовых антенн на базе метаматериалов.

Одним из лидеров по производству крупногабаритных и легких сферических линз Лüneберга для операторов сотовой связи является компания MatSing [82]. Для создания сферических линз Лüneберга используется уникальный запатентованный [83] искусственный диэлектрик, состоящий из множества электрически малых блоков диэлектрического материала (например, пенополистирол), имеющих по меньшей мере один проводник или проводящее волокно. Для изготовления такого материала проводники внедряют в диэлектрик, который затем нарезают на маленькие куски и помещают хаотично в контейнер, где они склеиваются в сплошной образец. Управление значениями $\epsilon_{эфф}$ происходит за счет изменения количества внедренных проводников в один блок. Такая технология

изготовления искусственного диэлектрика позволяет создавать крупноразмерные, легкие сферические линзы Лüneберга, обладающих высокими значениями КНД, небольшими потерями, низким УБЛ и широким сектором обзора. Однако из-за технологически сложного для изготовления искусственного диэлектрика, антенные системы имеют высокую стоимость.

1.3.4. Применение свойств трансформационной оптики для создания МЛА линзового типа

Трансформационная оптика (ТО) – это новое направление в науке о свете, появившееся благодаря развитию метаматериалов. Прямой задачей оптики можно назвать нахождение траектории лучей по заданным значениям тензоров диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости. Задача ТО обратная – задавая определенным образом пространственное распределение ϵ и μ , можно добиться распространения лучей по заранее заданным криволинейным траекториям [84]. Первые работы [85-87], описывающие математический аппарат ТО, появились в 2006 году. Благодаря этому стало возможным разрабатывать неоднородные оптические среды, свойства которых превосходят как возможности натуральных материалов, так и традиционных оптических систем. В работах [86-87] впервые была продемонстрирована возможность создания «плаща-невидимки»: световые лучи огибали сферическую область пространства, доступ в которую запрещен свету. При этом любой объект, оказавшийся внутри этой области, становится невидимым (рисунок. 1.21)

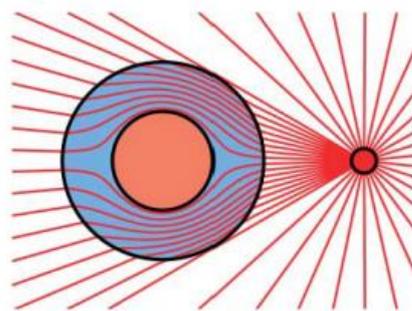


Рис. 1.21. Огибание лучами сферической области [4]

Теоретические основы ТО базируются на инвариантности уравнений Максвелла относительно координатных преобразований $(x, y, z) \rightarrow (x', y', z')$. при этом необходимо, чтобы тензоры ε и μ , исходной системы координат преобразовывались следующим образом [86, 87]:

$$\begin{cases} \varepsilon' = \frac{\mathbf{J}\varepsilon\mathbf{J}^T}{\det(\mathbf{J})} \\ \mu' = \frac{\mathbf{J}\mu\mathbf{J}^T}{\det(\mathbf{J})} \end{cases}, \quad (1.9)$$

где \mathbf{J} – матрица Якоби преобразования координат $(x, y, z) \rightarrow (x', y', z')$; ε' – тензор диэлектрической проницаемости в новой системе координат; μ' – тензор магнитной проницаемости в новой системе координат.

Подробное описание теории ТО, а также обзор современных достижений в этой области содержится в работах [64, 84-87]

Теория ТО применяется для уменьшения размеров или создания новых профилей линзовых антенн. В работе [88] описана возможность уменьшения размеров линзы Ротмана на 27% вдоль оптической оси благодаря применению свойств ТО. При этом у разработанной линзы сохранился широкий сектор обзора и высокие значения КНД в каждом из лучей.

В работах [89-93] описаны различные варианты антенных систем на основе трехмерно-трансформированных линз Люнеберга с тонким профилем. Несмотря на свой тонкий профиль, фокус расположен не на поверхности линзы. В работах [94-96] описан запатентованный [97] профиль трансформированной линзы Люнеберга (для азимутального сканирования), у которой градиентное распределение n подобрано таким образом, чтобы фокус располагался на прямой. Трехмерно трансформированная линза Люнеберга, аналогичная линзе из [97], но позволяющая осуществлять трехмерное сканирование, описана в работах [98, 99]. Для запитки линзы используются плоская АР. На рисунке 1.22 показаны примеры построения МЛА на основе трехмерно-трансформированных линз Люнеберга.

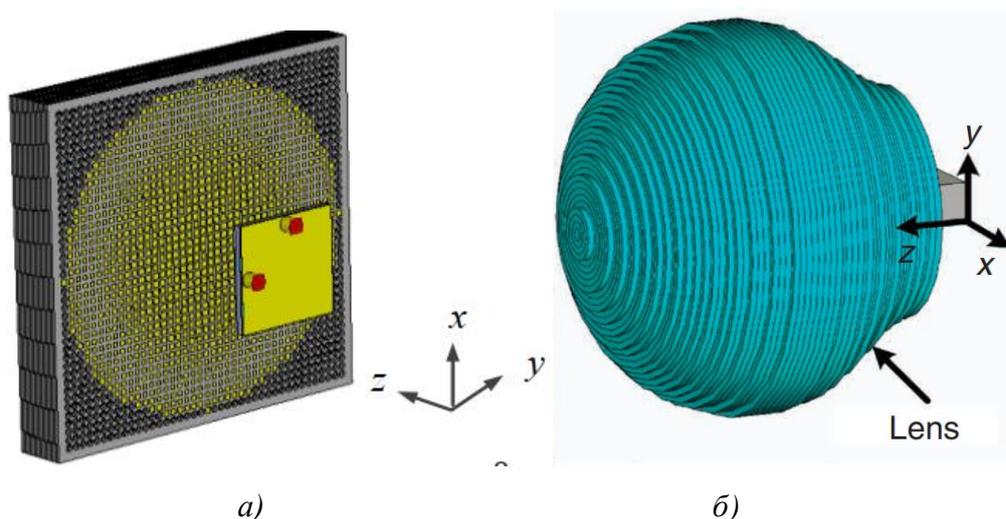


Рис. 1.22. Примеры построения МЛА на основе трехмерно-трансформированных линз Люнеберга: а) с тонким профилем; б) с запиткой плоской линейной АР

Необходимо отметить, что для облегчения технической реализации таких линзы вводят определенные ограничения и приближения: не учитывают значения трансформированной μ ; не учитывают продольную составляющую ϵ ; полагают $n=1$ в тех областях, в которых расчетные значения оказались меньше единицы [91, 92].

Для изготовления трехмерно трансформированных линз используются диэлектрические композитные материалы [89]; печатные платы [95]; трехмерная печать [98].

Основные недостатки построения МЛА на основе трансформированных ЛЛ связаны с повышением значений n , которое способствует усложнению конструкции, а также увеличению нежелательных отражений от поверхности линзы.

1.4. Многолучевые антенны на основе плоских печатных линз

Технологические достижения в области производства многослойных печатных плат, а также недорогих интегральных схем открыли множество перспектив для применения в системах связи МЛА линзового типа,

реализованных на основе плоских линз. В таких линзах преобразование сферического фронта волны источника в плоский осуществляется за счет изменения электрических длин кабелей (или полосковых линий), соединяющих дискретные элементы АР теневой и облучаемой стороны. Обычно (из-за простоты изготовления) в качестве элементов АР используют микрополосковые патчи. На рисунке 1.23 схематично показан принцип работы таких линз, а в работе [100] описана плоская линза, у которой в качестве соединительных линий используются микрополосковые линии передачи, закрепленные перпендикулярно к печатным платам теневой и облучаемой стороны.

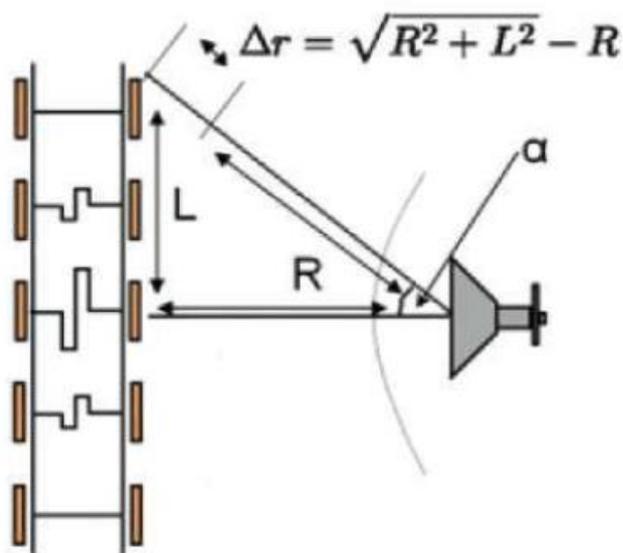


Рис. 1.23. Принцип работы плоских линзовых антенн

Однако линзы с фокусировкой в одной точке не позволяют реализовать МЛА с широким сектором сканирования, поскольку такие плоские линзы имеют только одну степень свободы – электрическую длину соединительных линий. Планарные линзы с двумя степенями свободы впервые были описаны и запатентованы МакГрафом [101-103]. Для реализации широкоугольного сканирования он предложил ввести еще одну степень свободы за счет

независимости ординат расположения патчей на теневой и облучаемой стороне линзы. На рисунке 1.24 схематично показана линза МакГрафа.

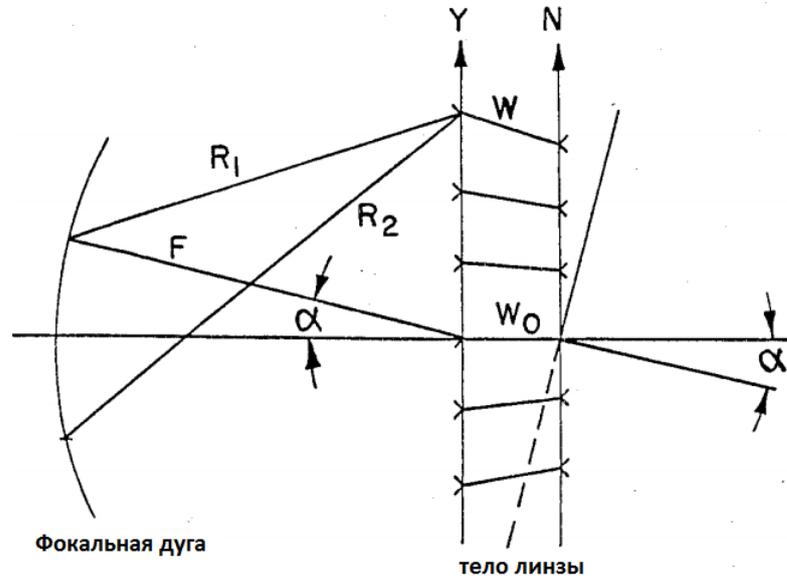


Рис. 1.24. Плоская линза с двумя степенями свободы (линза МакГрафа)

Конструкция линзы, описанная в патентах [102, 103], представляет собой многослойную печатную плату: две микрополосковые АР имеют общее заземление. В качестве линий задержек используются микрополосковые линии передачи, вытравленные на одной печатной плате с патчами. Для соединения линий задержек теневой и облучаемой стороны используются металлические штырьки (рисунок 1.25) или щелевая связь (щелевой трансформатор). [103]

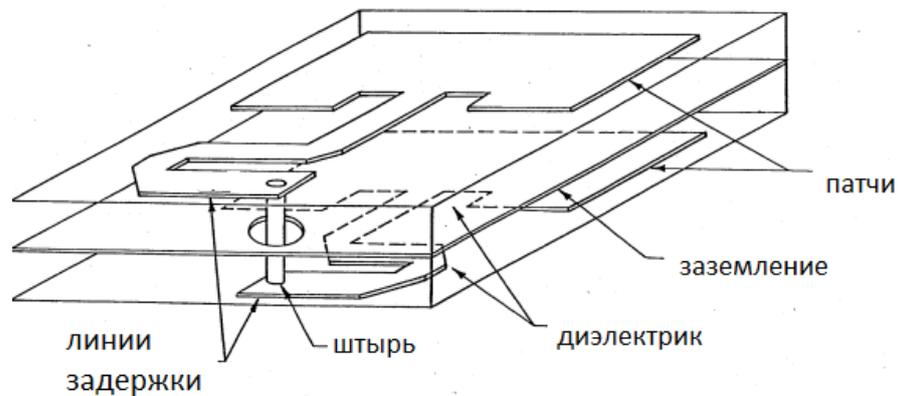


Рис. 1.25. Схематичное изображение элемента АР линзы МакГрафа с соединительным штырем

В работе [104] проведено исследование азимутальной МЛА с двумя ортогональными поляризациями на основе линзы МакГрафа с сектором сканирования в азимутальной плоскости $\pm 45^\circ$. Описаны направленные и поляризационные характеристики антенной системы. В качестве элементов АР используются патчи на двух ортогональных поляризациях (квадратные патчи, запитываемые двумя портами). Для соединения линий задержек теневой и облучаемой стороны используются штырьки по аналогии с оригинальным патентом [103].

Поскольку линзы МакГрафа должны обеспечивать широкий сектор сканирования, то апертурно-связанные патчи рассматривают с точки зрения селективных поверхностей. Это позволяет уменьшить зависимость коэффициента передачи одного дискретного элемента АР от угла прихода волны. В работе [105, 106] описаны достоинства и недостатки при использовании щелевого трансформатора. В работах [107-109] описаны линзы МакГрафа, у которых шестиугольные патчи теневой и облучаемой стороны соединены резонатором на основе копланарного волновода, который находится в общей плоскости земли. В работе [110] описана антенная система на основе плоской линзы, работающей на частоте 60 ГГц, у которой квадратные патчи соединены металлическими штырями.

Подробный обзор современных методов и подходов для создания плоских линз содержится в работе [111].

Основные достоинства МЛА на основе плоских печатных линз:

- небольшая масса;
- плоский профиль, позволяющий существенно уменьшить продольные габариты антенной системы;
- возможность реализации развязки по поляризации для облучателя и самой антенной системы (например, патчи теневой стороны имеет круговую поляризацию, тогда как патчи облучаемой стороны – линейную поляризацию);

1.5 Выводы по первой главе

В первой главе проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и производства МЛА линзового типа. Однако, многие важные аспекты в области исследования и создания МЛА линзового типа остаются недостаточно исследованы, а именно:

- разработка цилиндрических или сферических (полусферических) однородных линз, а также линз Люнеберга на основе параллельных печатных плат;

- исследование способов уменьшения анизотропии в печатных метаматериалах;

- исследование влияния дисперсии метаматериалов на направленные и частотные характеристики антенных систем;

- исследование в широкой полосе направленных и частотных свойств трехмерно-трансформированных линз Люнеберга;

- разработка двухкоординатных МЛА на основе плоских печатных линз с возможностью развязки поляризации;

- исследование способов уменьшения УБЛ в линейных АР из сферических линзовых антенн.

2. Исследование и разработка МЛА линзового типа на основе параллельных печатных плат

Печатные платы широко используются для изготовления различных радиотехнических устройств, в частности, и для создания линзовых антенн. Они позволяют обеспечить высокую точность изготовления и свести к минимуму количество ошибок при сборке, а созданные на их основе антенные системы могут иметь различную форму и конструкцию, обладают небольшой массой, технологически простые в производстве.

Основные недостатки при использовании печатных плат связаны с наличием дисперсии и анизотропии у печатных периодических структур. Анизотропия препятствует созданию объемных (например, сферических антенн), поэтому печатные платы широко используются для создания планарных или цилиндрических линзовых антенн [112].

Для реализации МЛА линзового типа, позволяющих осуществлять сканирование в двух плоскостях, используются многослойные печатные линзы, у которых для корректировки фронта волны используются полосковые линии задержки различной длины.

В настоящей главе разработаны различные типы линзовых антенн на основе параллельных печатных плат: цилиндрические, полусферические, сферические. Исследовано влияние дисперсии и анизотропии печатных метаматериалов на направленные и частотные свойства антенных систем. Разработана методика минимизации анизотропии в печатных метаматериалах. Исследована сверхширокополосная МЛА на основе полусферической метаматериальной линзы. Разработана линзовая антенна, на основе многослойных печатных плат, позволяющая реализовать развязку по поляризации – антенная система имеет круговую поляризацию, а облучатели линзы имеют линейную.

2.1. Методика расчета эффективных параметров метаматериала на основе измеренных компонентов комплексной матрицы рассеяния

Проведенный анализ современного состояния и перспективных тенденций развития линзовых антенн на основе метаматериалов показал, что для расчета эффективных параметров метаматериалов широко используется методика, позволяющая на основе измеренных компонентов комплексной матрицы рассеяния (S -параметров) рассчитать комплексные значения $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$.

Первые работы, посвященные вычислению диэлектрических параметров однородной среды через измеренные S -параметры появились в 70-х годах XX века [113, 114]. В них описан метод Николсона-Росса-Вейра, позволяющий рассчитать диэлектрические параметры однородной среды, помещенной в линию передачи (например, отрезки коаксиальных и волноводных линий), через измеренные и пересчитанные к границам материала S -параметры (рисунок 2.1).

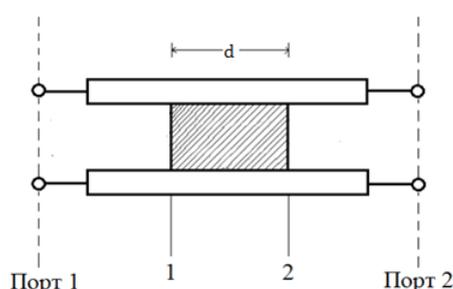


Рис. 2.1. Линия передачи с исследуемым образцом

Результаты, получаемые при исследовании однородных материалов, имеют хорошую точность, а сам метод является простым для использования. Подробное описание достоинств и недостатков оригинального метода содержится в [115], а в [116, 117] описаны некоторые особенности, связанные с практическими измерениями S -параметров.

Поскольку метод Николсона-Росса-Вейра применяется для анализа однородных материалов, то при исследовании метаматериалов используется

гомогенизация сложная: сложная периодическая структура заменяется однородной изотропной средой с тем же электромагнитным откликом [118]. В общем случае метаматериалы обладают анизотропией: эффективные параметры искусственной среды могут отличаться в зависимости от поляризации или направления прихода волны [119]. Кроме того, отрицательный показатель преломления возможен только тогда, когда метаматериал возбуждается плоской волной с определенным направлением поляризации и углом падения. В связи с этим, для расчета эффективных параметров метаматериалов с использованием метода Николсона-Росса-Вейра необходимо использовать плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся вдоль оси симметрии ячейки периодической структуры, с линейной (горизонтальной или вертикальной) поляризацией [119].

В работах [120-122] описаны методы расчета эффективных параметров метаматериалов через измеренные S -параметры. Однако, приведенные в этих источниках методы имеют эквивалентные математические модели, о чем говорится в [118], а по своей сути они являются расширением оригинального метода Николсона-Росса-Вейра [123]. Для вычисления эффективных параметров среды можно воспользоваться соотношениями, например, из [118]:

$$Z_{\text{эфф}} = \pm Z_0 \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (2.1)$$

$$e^{ik_0 n_{\text{эфф}} d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z_{\text{эфф}} - Z_0}{Z_{\text{эфф}} + Z_0}}, \quad (2.2)$$

$$n_{\text{эфф}} = \frac{1}{dk_0} \left[(\text{Arg} [e^{ik_0 n_{\text{эфф}} d}] + 2\pi m) + i \text{Log} |e^{ik_0 n_{\text{эфф}} d}| \right], m \in Z, \quad (2.3)$$

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{k_0 n_{\text{эфф}} Z_{\text{эфф}}}{\omega}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{k_0 n_{\text{эфф}}}{\omega Z_{\text{эфф}}} \quad (2.5)$$

где: $Z_{эфф}$ и Z_0 – эффективное волновое сопротивление измеряемого образца и вакуума; S_{11} и S_{21} – S -параметры измеряемого образца; k_0 – волновое число свободного пространства.

Анализ соотношений (2.1)-(2.5) показывает, что одной паре значений S_{11} и S_{21} соответствует бесконечное множество значений для измеряемых действительных частей эффективных параметров. В литературе данную проблему называют неоднозначностью с выбором ветви. Простое физическое объяснение заключается в том, что потери вещества определяются однозначно, тогда как фаза измеряется с точностью до 2π [118]. Неправильный выбор ветви при исследовании материалов приводит к недостоверным результатам. Поэтому при исследовании эффективных параметров метаматериала в широкой полосе (или обычного диэлектрика) необходимо точно выбрать ветвь (значение m в формуле (2.3)).

Для электрически тонких материалов проблемы неоднозначности с выбором ветви не возникает – используется «основная ветвь» (в соотношении (2.3) $m=0$). Проблема возникает при увеличении частоты с ростом электрических размеров материала. Для устранения неоднозначности при измерении слабодисперсионных материалов в оригинальной работе [114] анализируется время группового запаздывания. Поскольку метаматериалы обладают дисперсией, то для устранения неоднозначности с выбором ветви возможно использовать соотношения Крамерса-Кронига: интегральная связь между действительной и мнимой частями любой комплексной функции, аналитичной в верхней полуплоскости. По известной мнимой части частотной зависимости $n_{эфф}(\omega)$ из формулы (2.3) действительная часть $n_{эфф}(\omega)$ определяется соотношением [119, 123]:

$$Re\{n_{эфф}(\omega)\} = 1 + \frac{2}{\pi} P \int_0^{+\infty} \frac{\omega' Im\{n_{эфф}(\omega')\}}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' , \quad (2.6)$$

где символ P означает, что интеграл берется в смысле главного значения.

Так как невозможно измерить S -параметры в бесконечном частотном диапазоне, в соотношении (2.6) используют конечные пределы. Для повышения точности диапазон интегрирования должен быть как можно больше. Современные пакеты трехмерного моделирования электромагнитного поля позволяют определить S -параметры в очень широком диапазоне частот, поэтому использование соотношения (2.6) позволяет с хорошей точностью выбрать ветвь. Подробное описание использования соотношений Крамерса-Кронига для устранения неоднозначности с выбором ветви при анализе метаматериалов приведено в работах [119, 123].

В работе [124] предложен другой подход для устранения неоднозначности с выбором ветви. Данный метод базируется на том факте, что для любого исследуемого материала частотные зависимости $\varepsilon_{эфф}(\omega)$ и $\mu_{эфф}(\omega)$ являются непрерывными функциями. Поскольку мнимые части эффективных параметров определены однозначно, то непрерывность $\varepsilon_{эфф}(\omega)$ и $\mu_{эфф}(\omega)$ в данном случае подразумевает непрерывность $Re(n_{эфф}(\omega))$. Суть метода заключается в нахождении первой производной $Re(n_{эфф}(\omega))$, а также вычислением производной в точках разрыва, в которых кривая зависимости $Re(n_{эфф}(\omega))$ при $m=0$ в формуле (2.3) имеет скачкообразное поведение, меняя знак значения с $\pm x$ на $\mp x$ (где x – положительное число). Таким образом, сравнивая величину производной $Re(n_{эфф}(\omega))$ и производной в точках разрыва, выбирается значение m в соотношении (2.3).

Следует отметить, что при практическом использовании метаматериалов (например, при разработке линзовых антенн), размер периодической структуры метаматериала сопоставим с одной десятой длины волны, а геометрические параметры периодической структуры фиксируются для конкретной частоты. Поэтому в практических работах, посвященных разработке антенных систем на основе метаматериалов (например, [92]), в соотношении (2.3) используется основная ветвь.

В дополнение к неоднозначности с выбором ветви, существует еще ряд особенностей, которые вносят определенные ограничения при практическом расчете эффективных параметров с использованием метода Николсона-Росса-Вейра. Например, когда размер исследуемого образца кратен половине длины внутри материала, возникает резонанс, который в литературе называют резонансом Фабри-Перо [118, 125, 126]. Это может привести к появлению неоднозначных значений $\varepsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$ на некоторых частотах. Более подробное описание этой проблемы и способы ее решения приведены в [118, 125, 126]. Также расчет эффективных параметров не учитывает параметры окружающей среды или влияние рядом расположенных предметов (например, антенн или усилителей) [123]. Более подробное описание достоинств и недостатков метода расчета эффективных параметров метаматериалов через измеренные S -параметры приведено в [118].

Несмотря на недостатки, метод вычисления эффективных параметров метаматериалов по измеренным S -параметрам нашел широкое практическое применение. С его помощью возможен синтез и анализ трехмерных и планарных периодических структур для проектировки различных устройств. Достоверность получаемых результатов подтверждена экспериментально, и было показано, что рассчитанные эффективные параметры не нарушают никаких физических ограничений [123].

2.2. Исследование цилиндрической линзы, состоящей из параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями

В настоящем разделе представлены результаты расчетов эффективных параметров метаматериала H -образной структуры, на основе которых были выбраны геометрические параметры метаматериала для разработки цилиндрической линзовой антенны. Исследованы направленные и частотные характеристики цилиндрической метаматериальной линзы для систем спутниковой связи, выполненной на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала,

обладающего дисперсией. Проведено сравнение полученных значений с характеристиками линзы из однородного диэлектрика [127].

2.2.1. Эффективные параметры метаматериала Н-образной структуры

Поскольку исследуемая линза предназначена для работы на частотах выше 10 ГГц, размер периодической структуры метаматериала (a) вдоль осей ox , oy , oz выбран согласно [81], и составляет 3,33 мм – размер сопоставим с одной десятой длины волны на частоте 10 ГГц. Ячейка метаматериала представляет собой металлическую Н-образную структуру, вытравленную на диэлектрической подложке из тонкого стеклотекстолита толщиной 0,2 мм. Толщина металлизации меди – 0,035 мм. Длины вертикальных и горизонтальных проводников имеют одинаковую длину (w). На рисунке 2.2 показан внешний вид используемой ячейки метаматериала.

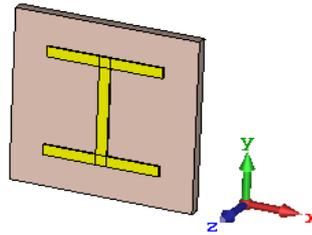


Рис. 2.2. Ячейка метаматериала Н-образной структуры

Использование Н-образной структуры метаматериала для проектировки линзовой антенны обусловлено следующими факторами: зависимостью $Re(\epsilon_y)$ от величины w ; значениями $Re(\mu_{эфф})$ близкими к единице; наличием дисперсии и анизотропии [128].

В работе [128] показано, что в зависимости от соотношения w/a (в данном случае под a подразумеваются размеры ячейки метаматериала вдоль оси ox и oy) выделяют несколько случаев или «режимов работы». При соотношении $w/a \rightarrow 1$ – сильносвязный. В данном случае между двумя горизонтальными проводниками соседних ячеек сосредоточена большая величина поверхностного заряда (величина зазора между металлическими

полосками крайне мала), которая приводит к увеличению дипольного момента. Следовательно, приводит к большим резонансным значениям $Re(\epsilon_y)$. При соотношении $w/a < 1$ не наблюдается большой величины поверхностного заряда, как в предыдущем случае, однако сохраняется дисперсия. Уменьшение величины w/a приводит к уменьшению значений $Re(\epsilon_y)$ и снижению дисперсии [128].

Расчет $Re(\epsilon_y)$ ячейки метаматериала осуществляется с использованием соотношений (2.1)-(2.5) и численного метода Вейланда [129-131]. На рисунке 2.3(а) показана зависимость $Re(\epsilon_y)$ от частоты для случая $w/a \rightarrow 1$. На рисунке 2.3(б) – зависимость $Re(\epsilon_y)$ от частоты для случая $w/a < 1$.

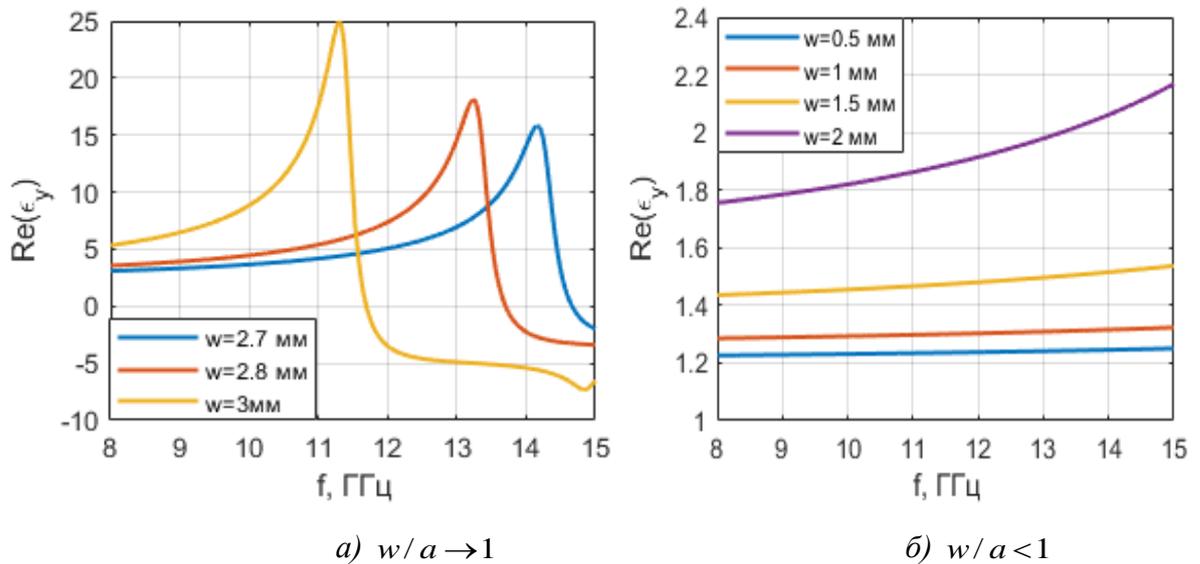


Рис. 2.3. Графики зависимости $Re(\epsilon_y)$ от частоты

Анализ полученных результатов показывает, что для проектировки линзовых антенн целесообразно использовать случай $w/a < 1$, поскольку у частотной зависимости $Re(\epsilon_y)$ отсутствуют резонансные большие значения. Также следует отметить, что при увеличении w возрастает величина $Re(\epsilon_y)$, а также увеличивается дисперсия. При малых значениях w дисперсия пренебрежимо мала.

На рисунке 2.4 представлена зависимость $Re(n_{эфф})$ от длины проводников w на частоте 10 ГГц, полученная на основе рассчитанных значений ε_y .

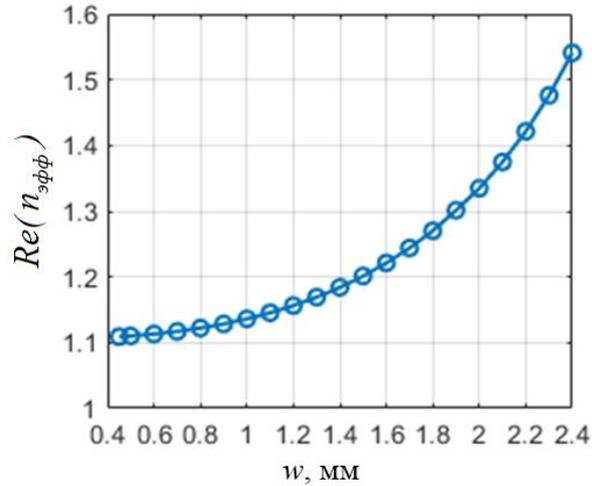


Рис. 2.4. Частотная зависимость $Re(n_{эфф})$ от длины проводников w

Из анализа полученной зависимости $Re(n_{эфф})$ от длины проводников w следует, что минимальное значение $Re(n_{эфф})$ на частоте 10 ГГц составляет 1,109.

2.2.2. Направленные и частотные характеристики цилиндрической линзы из параллельных печатных плат с нанесенной периодической Н-образной структурой метаматериала

Геометрические параметры исследуемой линзы:

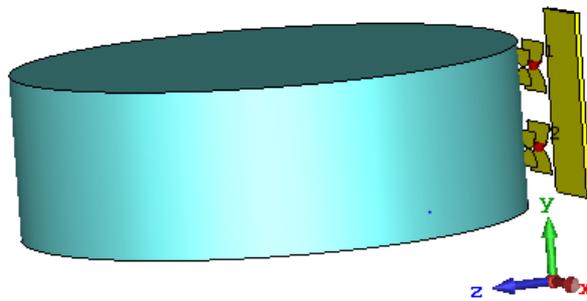
- диаметр линзы равен 100 мм, то есть кратен трем длинам волны на частоте 10 ГГц;
- высота линзы составляет 33,3 мм (10 ячеек метаматериала);
- количество печатных в линзе 30 штук.

Длина металлических проводников метаматериала $w=2$ мм, то есть значение $Re(\varepsilon_y)$ равно 1,82 на частоте 10 ГГц. Величина диэлектрической проницаемости однородной линзы равна двум. Выбор данного значения w обусловлен следующими факторами:

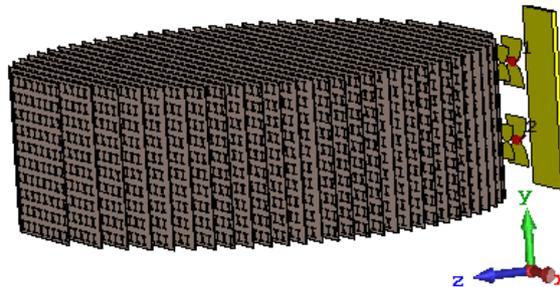
– метод расчета эффективных параметров метаматериала по формулам (2.1)-(2.5) не учитывает взаимного влияния соседних ячеек периодической структуры, а также параметров окружающей среды и влияние расположенных рядом предметов (облучателей линзы и т.д.);

– величина $Re(\varepsilon_y)$ увеличивается с ростом частоты из-за наличия дисперсии (рисунок 2.3(б)).

В качестве облучателя линзы используются вертикально расположенные друг под другом полуволновые вибраторы с рефлектором и директором. На рисунке 2.5 показаны исследуемые антенные системы.



а) линза из однородного диэлектрика



б) метаматериальная линза

Рис. 2.5. Внешний вид исследуемых антенных систем

Дальнейшие расчеты проводились с использованием метода конечного интегрирования Вейланда [129-131].

На рисунке 2.6 показано распределение поля линзы из однородного диэлектрика при падении линейно-поляризованной плоской волны в азимутальной (H-плоскости) на частотах 10 ГГц и 15 ГГц.

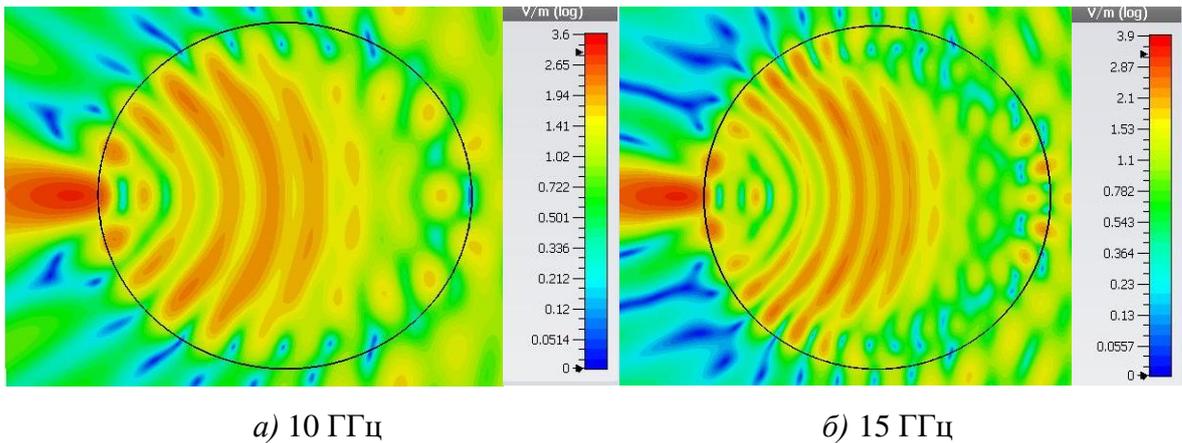


Рис. 2.6. Распределение поля в азимутальной плоскости линзы из однородного диэлектрика

Из полученных результатов моделирования следует, что фокусное расстояние не изменяется с ростом частоты, а его величина находится в пределах 61-66 мм.

Для конкретизации значения рассмотрим направленные характеристики линзы с облучателем (рисунок 2.5(а)) при разном фокусном расстоянии. На рисунке 2.7 и рисунке 2.8 представлены полученные частотные зависимости: коэффициента направленного действия (КНД); использования поверхности (КИП); ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. Также на рисунке 2.7 и рисунке 2.8(а) показаны теоретические частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48].

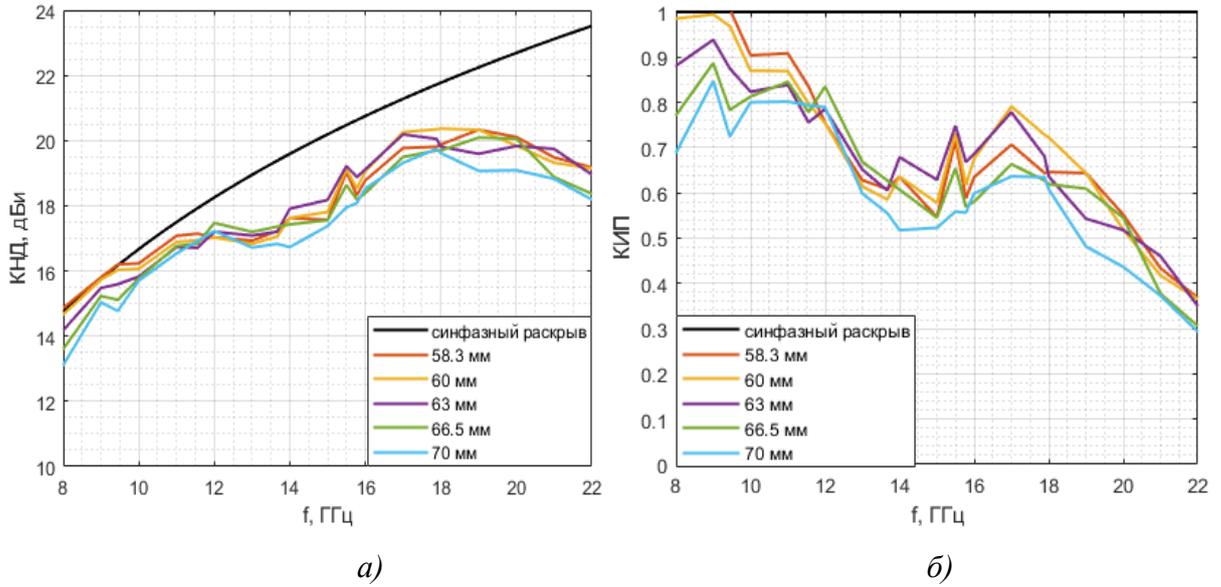


Рис. 2.7. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП (б) при разном фокусном расстоянии линзы из однородного диэлектрика

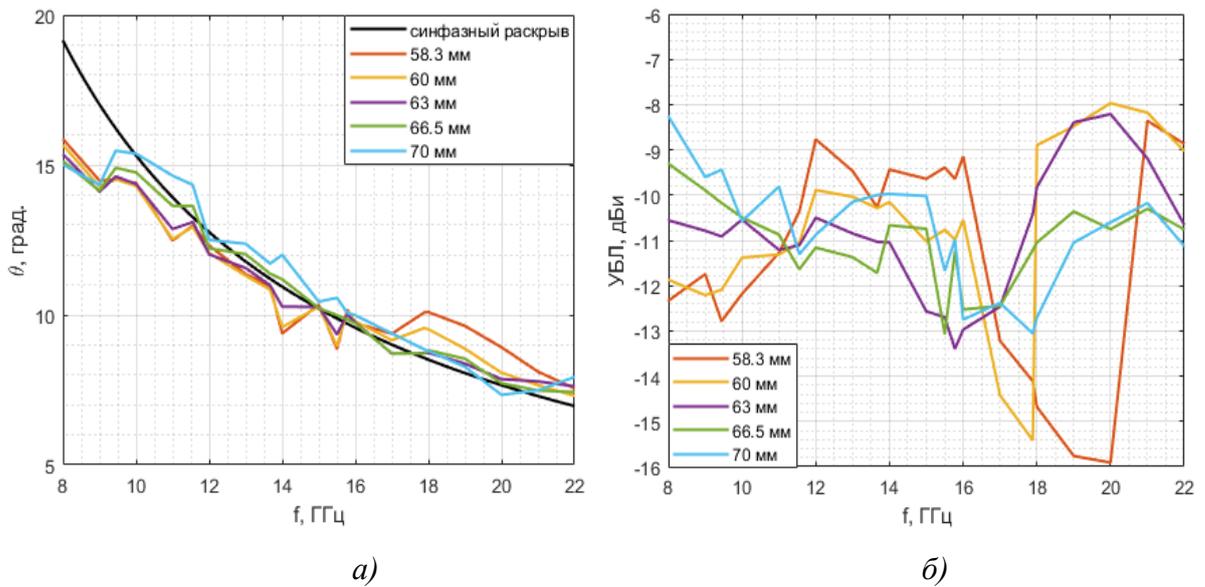
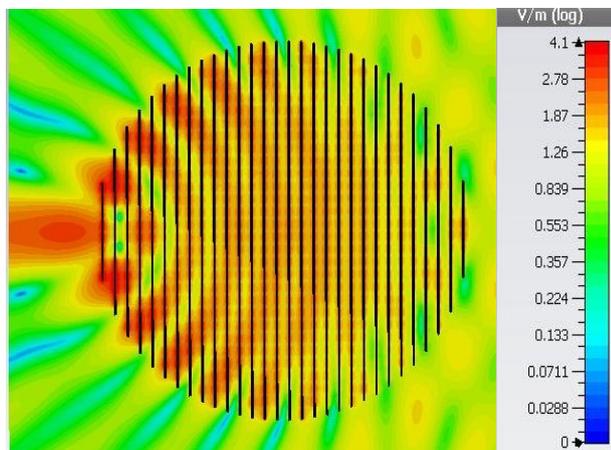


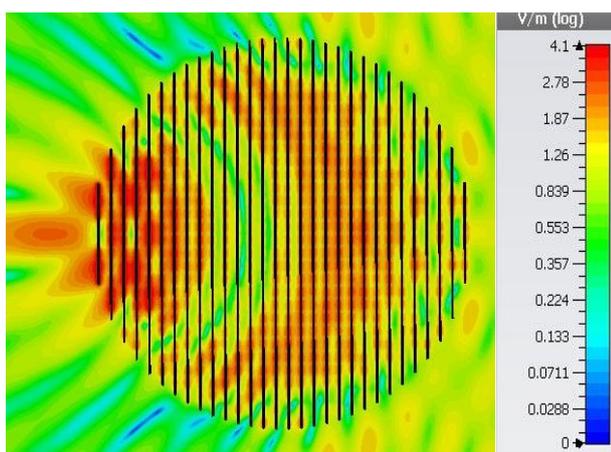
Рис. 2.8. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) при разном фокусном расстоянии линзы из однородного диэлектрика

Анализ полученных зависимостей показал, что целесообразно использовать фокусное расстояние равное 66,5 мм, поскольку при данном значении рабочая полоса антенной системы (по УБЛ ниже -10 дБ) 9-24 ГГц, то есть шире, чем при других значениях. Поэтому далее для линзы из однородного диэлектрика фокусное расстояния считаем равным 66,5 мм.

Рассмотрим распределение поля метаматериальной линзы в азимутальной (Н-плоскости) при падении линейно-поляризованной плоской волны параллельно печатным платам. На рисунке 2.9 показаны результаты моделирования на частотах 10 ГГц и 15 ГГц.



а) 10 ГГц



б) 15 ГГц

Рис. 2.9. Распределение поля в Н-плоскости метаматериальной линзы

Анализ распределения поля показывает, что, несмотря на наличие дисперсии у $Re(\epsilon_y)$ ячейки метаматериала (рисунок 2.2 и рисунок 2.3), фокусное расстояние не изменяется с ростом частоты, а его величина находится в пределах 61-67 мм.

Для конкретизации значения рассмотрим направленные характеристики линзы с облучателем (рисунок 2.5(б)) при разном фокусном расстоянии. На рисунке 2.10 и рисунке 2.11 представлены полученные частотные

зависимости: КНД; КИП; ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. Также на рисунке 2.10 и рисунке 2.11(а) показаны теоретические частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48].

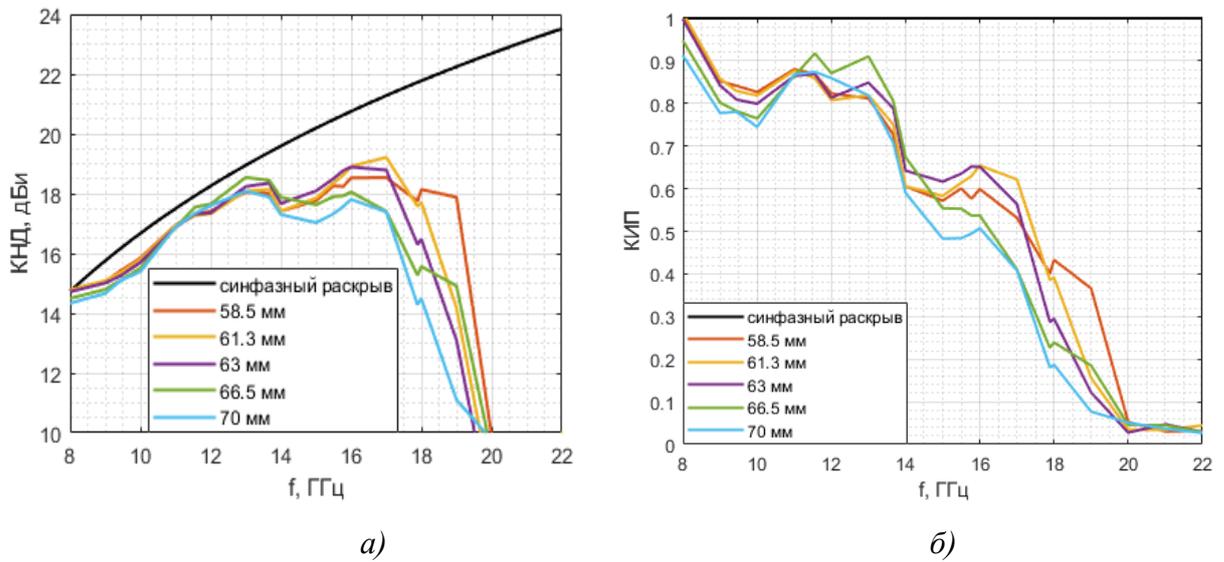


Рис. 2.10. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП (б) метаматериальной линзы при разном фокусном расстоянии

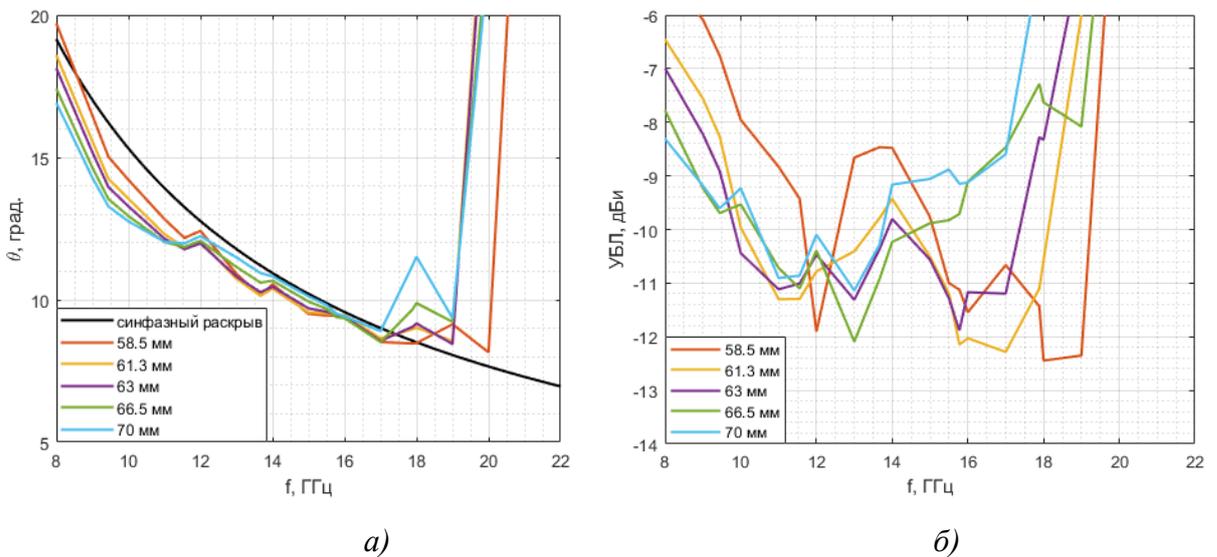


Рис. 2.11. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) метаматериальной линзы при разном фокусном расстоянии

На основе полученных результатов электродинамического моделирования можно заключить, что целесообразно использовать фокусное расстояние равным 61,3 мм, исходя из максимизации ширины рабочей полосы (по УБЛ ниже -10 дБ). Рабочая полоса антенной системы 10-17 ГГц. Далее для метаматериальной линзы фокусное расстояние считаем равным 61,3 мм, что на 5,2 мм меньше, чем у линзы из однородного диэлектрика.

Также следует отметить, что на частотах свыше 18 ГГц антенная система перестает функционировать из-за разваливающейся ДН:

- снижается КНД до 10 дБи (рисунок 2.10(а)) и КИП до 0,1 (рисунок 2.10(б));
- ширина главного лепестка ДН по уровню -3 дБ в 3-4 раза превышает ширину ДН синфазного равно-амплитудного раскрыва (рисунок 2.11(а));
- резко возрастает УБЛ.

Это объясняется увеличением электрических размеров ячейки метаматериала с ростом частоты: в области верхних частот (свыше 18 ГГц) данную структуру метаматериала уже нельзя считать однородной средой.

Для исследования влияния анизотропии метаматериала рассмотрим направленные и частотные характеристики антенной системы (рисунок 2.5(б)) при разном повороте облучателя относительно центра линзы (далее поворот облучателя). На рисунке 2.12 и рисунке 2.13 приведены частотные зависимости при разном повороте облучателя: КНД; КИП; ширины ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. На рисунке 2.12 и рисунке 2.13(а) показаны частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48]. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу представлена на рисунке 2.14.

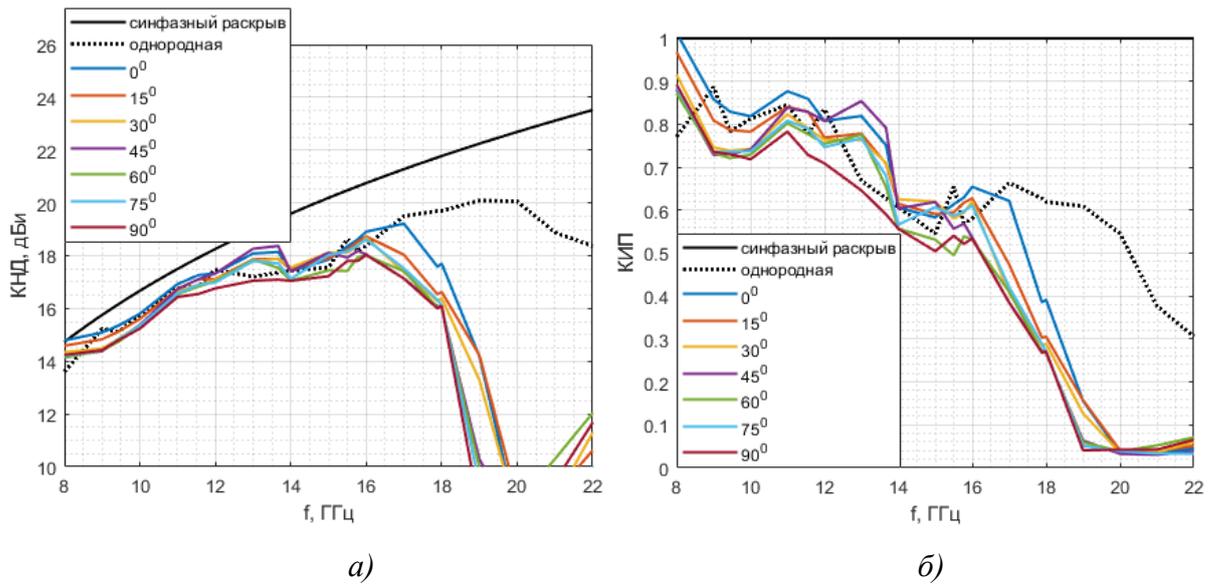


Рис. 2.12. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП(б) при разном повороте облучателя

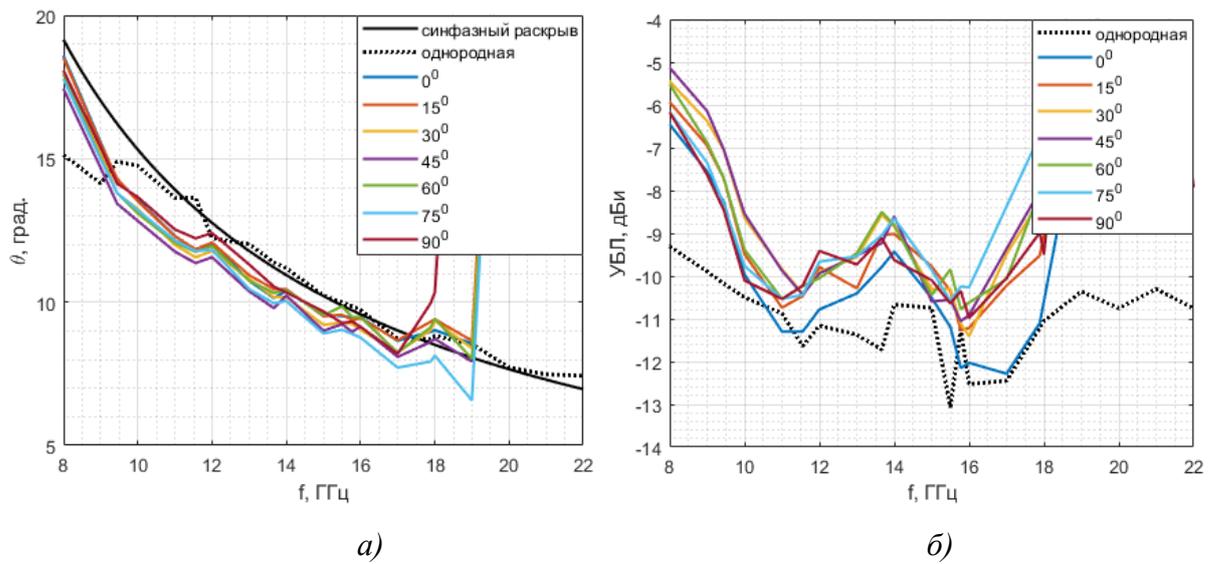


Рис. 2.13. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) при разном повороте облучателя

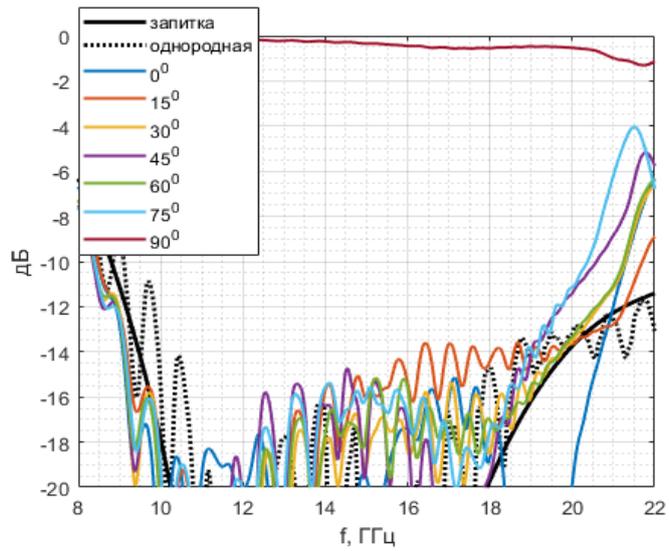


Рис. 2.14. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу

На рисунке 2.15 показаны ДН в азимутальной плоскости на частоте 10 ГГц метаматериальной линзы при разном повороте облучателя, а также для линзы из однородного диэлектрика. На рисунке 2.16 показаны объемные ДН исследуемых антенных систем на частоте 10 ГГц.

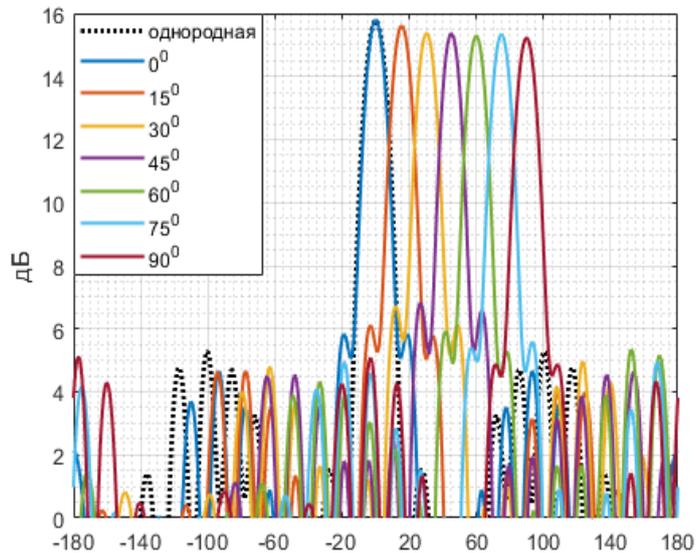


Рис. 2.15. ДН в азимутальной плоскости на частоте 10 ГГц при разном повороте облучателя

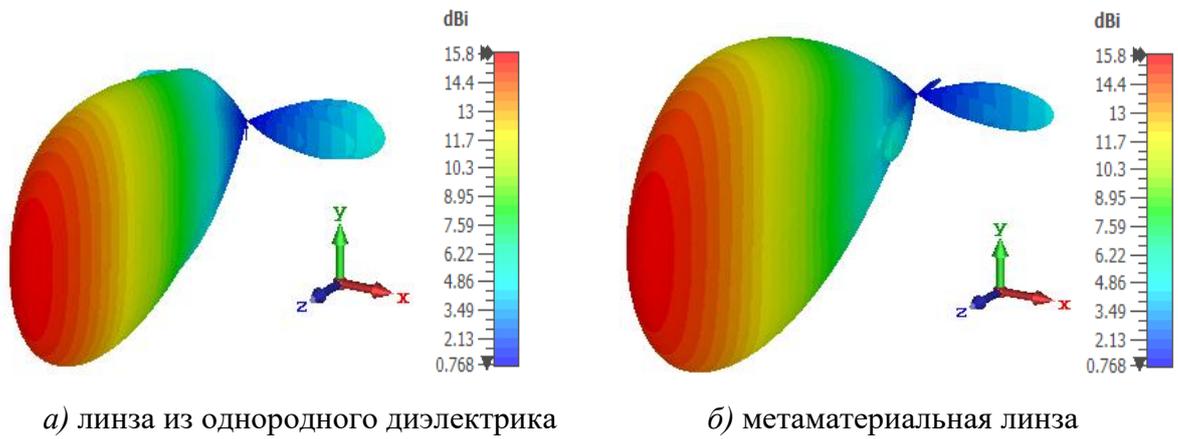


Рис. 2.16. Объемные ДН на частоте 10 ГГц

На основании полученных результатов можно заключить, что в диапазоне 10-16 ГГц:

- исследуемые антенные системы обладают схожими значениями КНД и КИП. В обоих случаях КНД на 1,5-2 дБ меньше КНД синфазного-равно амплитудного раскрыва, а КИП убывает с ростом частоты (рисунок 2.12);

- ширина ДН по уровню -3 дБ: у линзы из однородного диэлектрика близка к теоретической (отличие в пределах 1^0); у метаматериальной линзы на 1^0-3^0 уже теоретической (рисунок 2.13(а));

- УБЛ у метаматериальной линзы на 1-2 дБ выше, чем у линзы из однородного диэлектрика (рисунок 2.13(б));

- исследуемые антенные системы обладают схожими значениями коэффициента отражения по входу: ниже -15 дБ (рисунок 2.14);

- обе линзы имеют схожую форму ДН (рисунок 2.15 и рисунок 2.16).

Из-за наличия анизотропии у метаматериала при повороте облучателя у метаматериальной линзы наблюдается ухудшение направленных характеристик, а именно:

- снижаются значения КНД и КИП (рисунок 2.12);

- ширина ДН по уровню -3 дБ практически не изменяется, то есть отличие в пределах 1^0-2^0 (рисунок 2.13(а));

- возрастает УБЛ, а его величина превышает -10 дБ (рисунок 2.13(б));

– при повороте облучателя на 90° коэффициент отражения по входу близок к единице (рисунок 2.14).

Таким образом, в данном разделе рассчитаны эффективные параметры метаматериала Н-образной структуры, на основе которых были выбраны геометрические параметры метаматериала для создания цилиндрической линзы. Несмотря на наличие дисперсии у метаматериала, фокус у метаматериальной линзы не перемещается с ростом частоты.

Исследования направленных и частотных характеристик линзы из однородного диэлектрика и метаматериальной цилиндрической линзы показали, что обе антенные системы имеют схожие направленные и частотные характеристики. При этом у метаматериальной линзы: уже рабочая полоса и выше УБЛ; при повороте облучателя ухудшаются направленные свойства.

2.3. Влияние дисперсии метаматериалов на направленные и частотные характеристики цилиндрической линзы Люнеберга

В цилиндрических линзах Люнеберга n нелинейно зависит от радиальной координаты (1.3)-(1.8), имея максимальное значение в центре линзы и минимальное значения на краю. При этом максимальное значение n в центре линзы зависит от фокусного расстояния: чем больше фокусное расстояние, тем ниже максимум n и наоборот. При этом минимальное значение n на краю линзы не зависит от фокусного расстояния. Поэтому использование метаматериалов, обладающих дисперсией, может помешать созданию широкополосных антенных систем на основе цилиндрических линз Люнеберга.

В этом подразделе показана возможность создания цилиндрических линз Люнеберга на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. Проведено исследование влияния дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Люнеберга для двух типов линз: с фокусом на поверхности и с вынесенным

фокусом. Для трехмерного электромагнитного моделирования используется метода конечного интегрирования Вейланда [129-131].

Геометрические размеры исследуемых линз Люнеберга такие же, как и у метаматериальной цилиндрической линзы из подраздела 2.2.2: диаметр линзы равен 100 мм; высота линзы – 33,3 мм.

В качестве ячейки периодической структуры используется метаматериал Н-образной формы (рисунок 2.2). Для реализации требуемого закона изменения n используется зависимость $Re(n_{эфф})$ от w , построенная на частоте 10 ГГц (рисунок 2.4).

Поскольку минимальное значение $Re(n_{эфф})$ на частоте 10 ГГц составляет 1,109 (рисунок 2.4), то для синтеза цилиндрических линз Люнеберга используется общее решение, описываемое соотношениями (1.3)-(1.8). В качестве оболочки используется метаматериал минимальных размеров. Нормированное значение радиуса линзы под оболочкой ($r_{об}$ в формуле (1.8)) равняется 0,9021. Для линзы с вынесенным фокусом теоретическое фокусное расстояние составляет 65 мм ($1,3R$, где R – радиус линзы, равный 50 мм). На рисунке 2.17 показаны законы изменения n исследуемых в этом разделе линз Люнеберга. Необходимо отметить, что дискретизация закона изменения n в обеих линзах проводится с равномерным шагом размером, равным размеру периодической структуры метаматериала (3,33 мм).

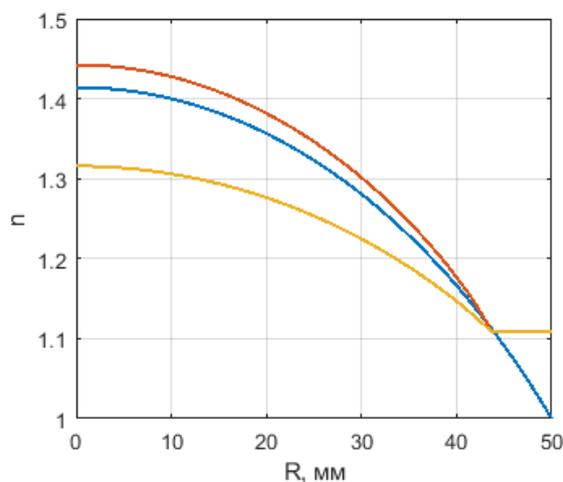


Рис. 2.17. Законы изменения коэффициента преломления исследуемых линз Люнеберга: синяя линия – классический закон изменения (формула

(1.3)); красная линия – линза с фокусом на поверхности; желтая линия – линза с вынесенным фокусом

2.3.1. Цилиндрическая линза Люнеберга с фокусом на поверхности

Рассмотрим распределение поля линзы в азимутальной (Н-плоскости) при падении линейно-поляризованной плоской волны параллельно печатным платам. На рисунке 2.18 показаны результаты численного моделирования на частотах 10 ГГц и 15 ГГц.

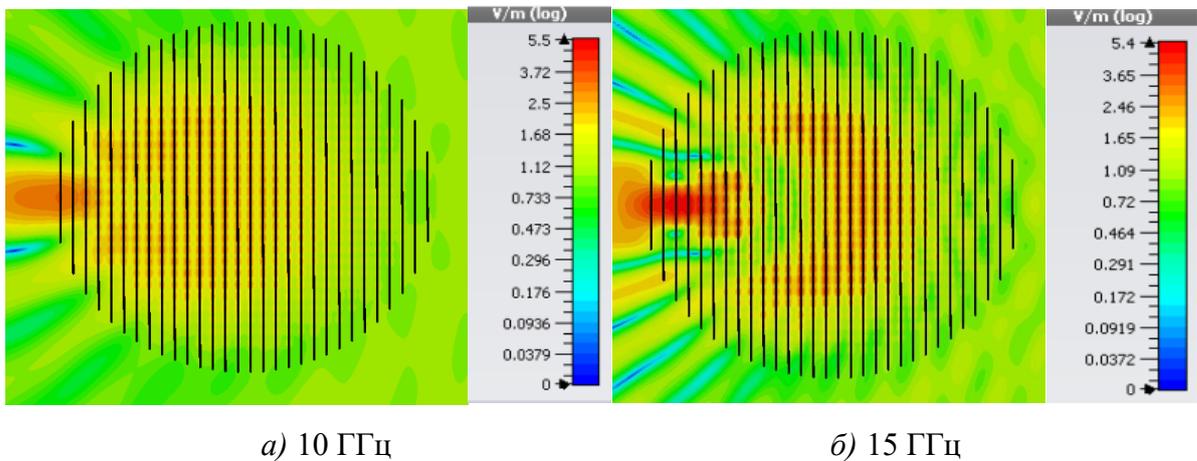


Рис. 2.18. Распределение поля в Н-плоскости линзы Люнеберга с фокусом на поверхности

Анализ полученных результатов показал, что на частоте 10 ГГц фокус расположен на краю крайней печатной платы, то есть на краю линзы, что совпадает с расчетным соотношением. Однако с ростом частоты фокус перемещается внутрь линзы. Данное явление объясняется следующим образом [132, 133]:

– из зависимостей, приведенных на рисунке 2.3 и рисунке 2.17 следует, что для реализации требуемого закона распределения n линзы Люнеберга длина металлических проводников w метаматериала возрастает от края печатной платы к ее центру, поэтому $Re(n_{эфф})$ увеличивается с ростом частоты ближе к центру линзы, а оставаясь постоянной величиной на краях линзы;

– при фиксированных значениях r_{ob} и n_{ob} в формулах (1.3)-(1.8) уменьшение фокусного расстояния приводит к увеличению n в центре линзы (и наоборот).

В качестве облучателя для линзы используются два вертикально расположенных друг под другом полуволновых вибратора с рефлектором и директором (облучатели из раздела 2.2.2). При исследовании направленных и частотных свойств облучатель располагался вплотную к краям текстолитовых пластин. На рисунке 2.19 и рисунке 2.20 приведены частотные зависимости при повороте облучателя: КНД; КИП; ширины ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. На рисунке 2.19 и рисунке 2.20(a) показаны теоретические частотные зависимости КНД, КИП и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равноамплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48]. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу представлена на рисунке 2.21.

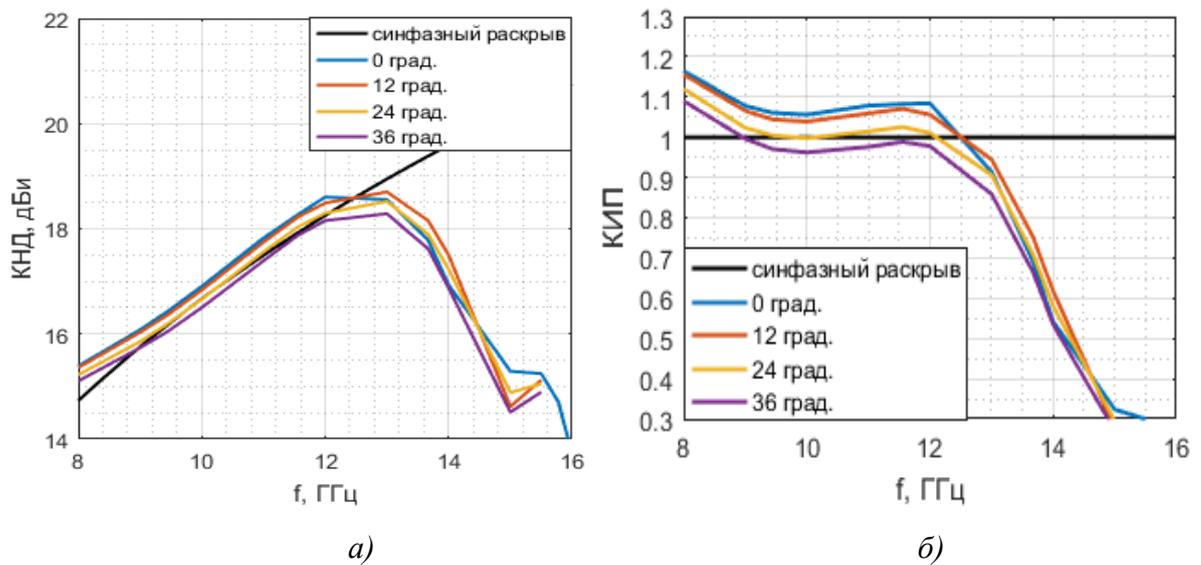


Рис. 2.19. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП(б) при повороте облучателя

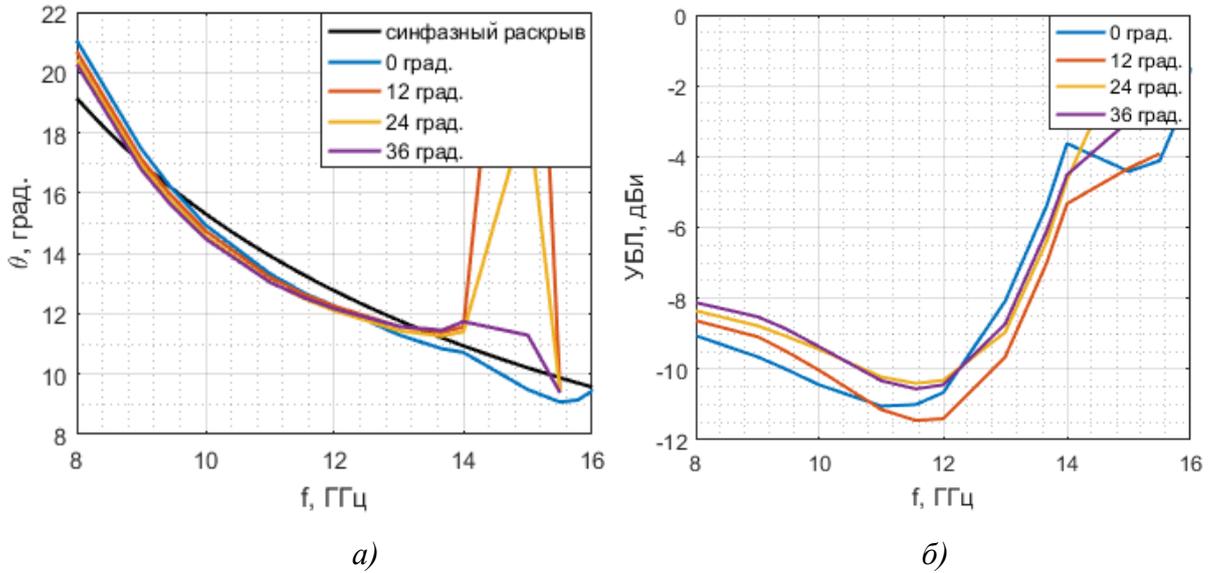


Рис. 2.20. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) при повороте облучателя

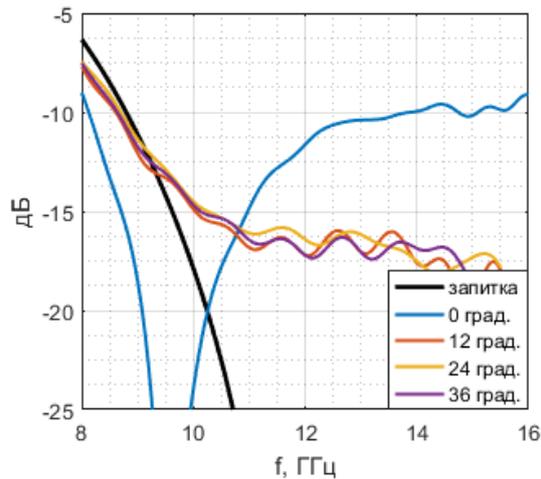


Рис. 2.21. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу

Анализ полученных результатов показал:

– из-за перемещения фокуса внутрь линзы с ростом частоты, антенная работает в диапазоне 10,5-12,5 ГГц, а на частотах свыше 14 ГГц разваливается ДН;

– в диапазоне 8-12 ГГц КНД больше теоретического примерно на 0,5 дБ, а КИП – на 0,1, а максимальных значений КНД и КИП достигают на частоте 12 ГГц;

– ширина ДН по уровню -3 дБ близка к теоретической: отличие менее 1° ;

На рисунке 2.22 представлены ДН в азимутальной на частоте 12 ГГц при разном повороте облучателя.

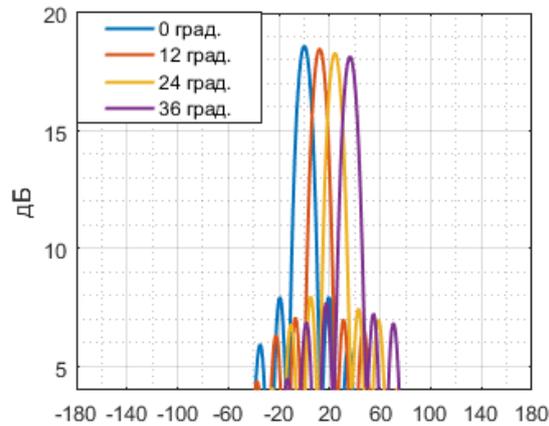


Рис. 2.22. ДН в азимутальной плоскости на частоте 12 ГГц при разном повороте облучателя

При повороте облучателя ухудшаются направленные свойства антенной системы: снижаются КНД и КИП, возрастает УБЛ, ширина ДН не изменяется. Однако, даже при небольшом сдвиге облучателя улучшилось согласование антенной системы. Это связано с тем, что при нулевом сдвиге облучатель расположен максимально близко к металлической структуре метаматериала, а уже при небольшом сдвиге отдаляется от нее.

Таким образом, в цилиндрической линзе Люнеберга с фокусом на поверхности наличие дисперсии у метаматериала приводит к перемещению фокуса при изменении частоты.

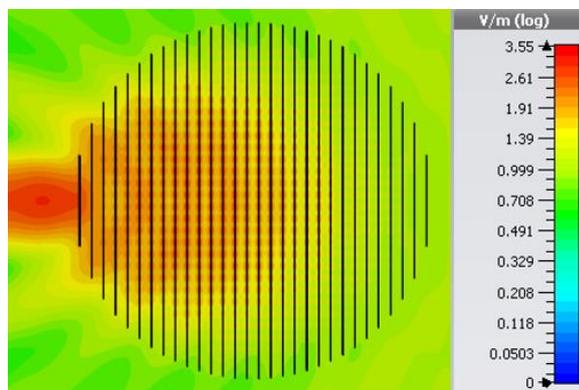
2.3.2. Цилиндрическая линза Люнеберга с вынесенным фокусом

Для более подробного изучения влияния дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Люнеберга, рассмотрим линзу с вынесенным фокусом.

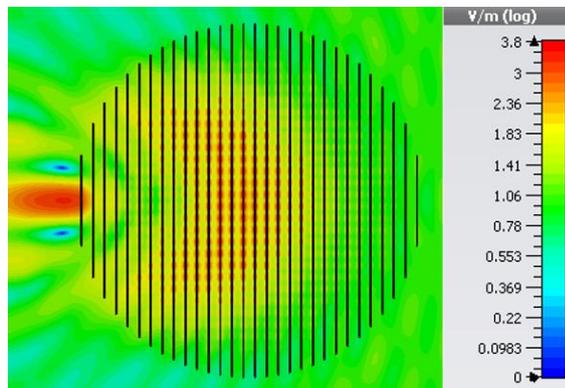
Из-за вынесенного фокуса снижается величина n в центре линзы (рисунок 2.17). Следовательно, при построении линзы используется

метаматериал с меньшими значениями w и дисперсией (рисунок 2.3 и рисунок 2.4). Поэтому можно предположить, что в исследуемой линзе дисперсия будет ниже, чем в линзе с фокусом на поверхности [134].

Рассмотрим распределение поля линзы в азимутальной (Н-плоскости) при падении линейно-поляризованной плоской волны параллельно печатным платам. На рисунке 2.23 показаны результаты численного моделирования на частотах 10 ГГц и 15 ГГц. На рисунке 2.24 показана зависимость фокусного расстояния от частоты.



а) 10 ГГц



б) 15 ГГц

Рис. 2.23. Распределение поля в Н-плоскости линзы Лüneберга с вынесенным фокусом

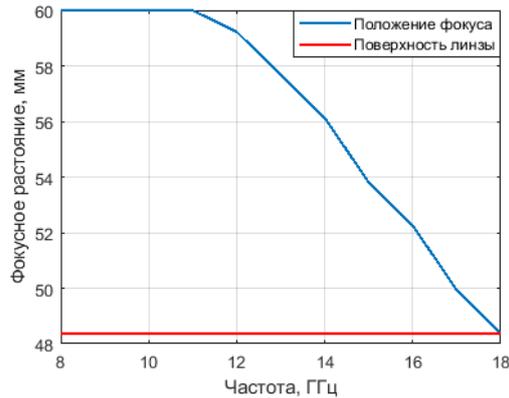


Рис. 2.24. Зависимость фокусного расстояния от частоты

Из полученных результатов следует, что фокусное расстояние уменьшается с ростом частоты из-за наличия дисперсии у ячейки метаматериала (рисунок 2.3), а на частоте 18 ГГц фокус расположен на крайней печатной плате.

На частоте 10 ГГц полученное фокусное расстояние равно 60 мм, тогда как расчетное составило 65 мм. Если учесть тот факт, что центр крайней печатной платы расположен на расстоянии 48,39 мм от центра линзы, то полученное в ходе моделирования значение отличается от теоретического на 2,1 мм. Возможная причина расхождения связана с тем, методика расчета эффективных параметров метаматериала, описанная в разделе 2.1, не учитывает взаимного влияния соседних ячеек периодической структуры, изменения эффективных параметров при наклонном падении волны.

Поскольку фокусное расстояние уменьшается с ростом частоты, то целесообразно рассмотреть направленные и частотные характеристики при разных значениях фокусного расстояния. В качестве облучателя для линзы используются те же облучатели, что и исследовании линзы Люнеберга с фокусом на поверхности из подраздела 2.3.1. На рисунке 2.25 и рисунке 2.26 приведены частотные: КНД, КИП, УБЛ. На рисунке 2.25 показаны теоретические частотные зависимости КНД и КИП для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48].

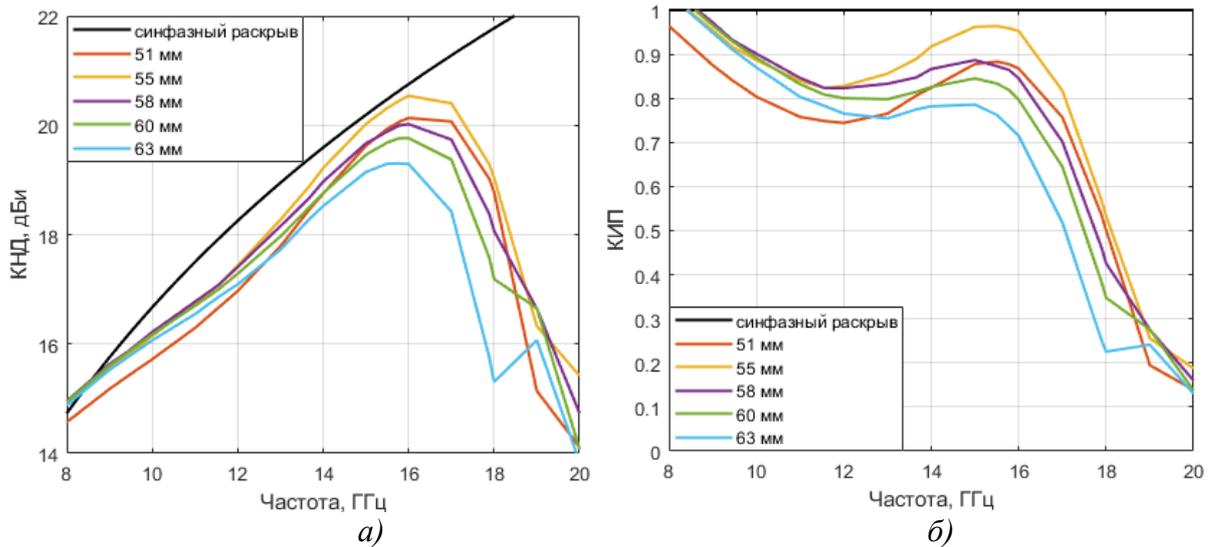


Рис. 2.25. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП(б) при разном повороте облучателя

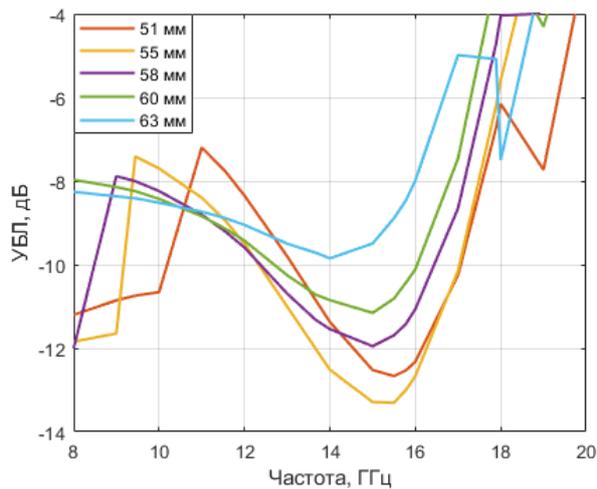


Рис. 2.26. Частотная зависимость УБЛ от частоты при изменении фокусного расстояния

На основе полученных зависимостей, исходя из максимизации КНД и КИП, минимизации УБЛ, а также расширения рабочей полосы, фокусное расстояние выбрано равным 55 мм. Рабочий диапазон антенной системы находится в пределах 12,3-17 ГГц.

Полученное фокусное расстояние отличается от теоретического примерно на 8 мм. Несмотря на то, что для синтеза линзы использовалась зависимость $Re(n_{эфф})$ от w , построенная на 10 ГГц (рисунок 2.4), антенная система работает с 12 ГГц.

На рисунке 2.27 и рисунке 2.28 приведены частотные зависимости при повороте облучателя: КНД; КИП; ширины ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. Теоретические частотные зависимости КНД, КИП и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48], показаны на рисунке 2.27 и рисунке 2.28(а).

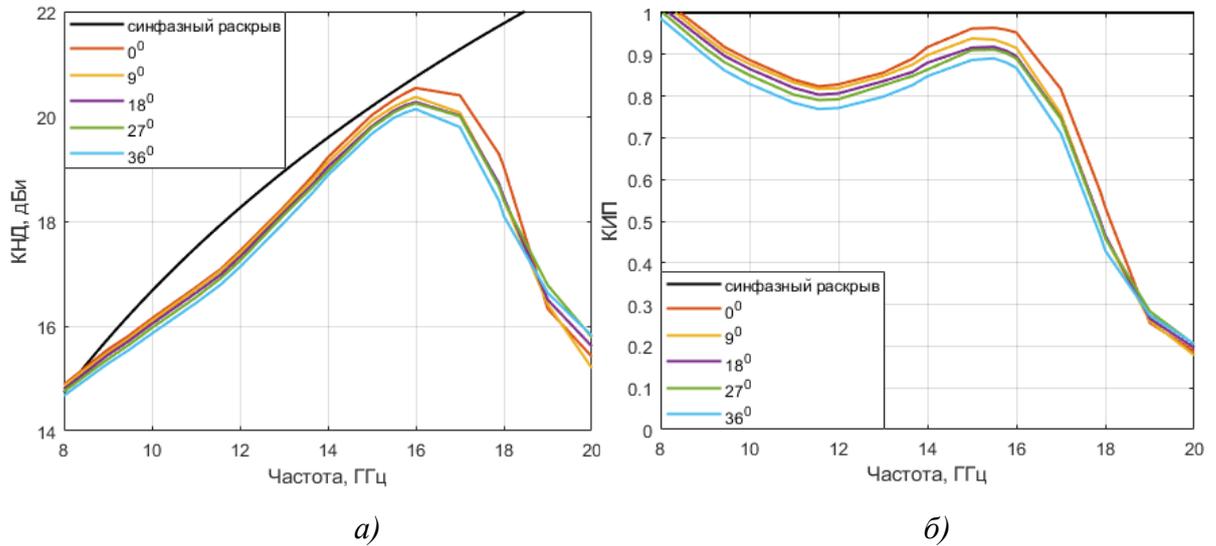


Рис. 2.27. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП (б) при повороте облучателя

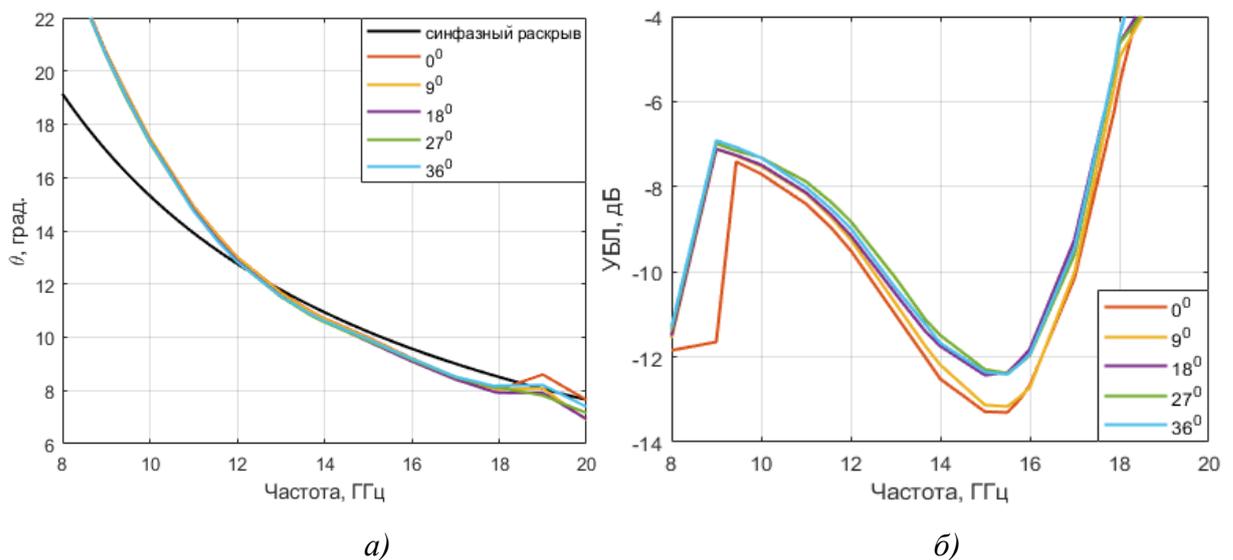


Рис. 2.28. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) при повороте облучателя

Из анализа полученных результатов следует:

– в диапазоне 8-16 ГГц КНД возрастает и отличается от теоретического не более, чем на 1 дБ, величина КИП превосходит 0,76;

– максимальных значений КНД и КИП достигают на частоте 16 ГГц, а на частотах выше 16 ГГц значения убывают;

– в диапазоне 8-12 ГГц ширина ДН превосходит теоретическое значение (отличается примерно на 1° - 3°), на частотах свыше 12 ГГц отличие незначительное (не более 1°);

При повороте облучателя ухудшаются направленные характеристики, аналогично линзе с фокусом на поверхности (раздел 2.3.1). Рабочая полоса антенной системы с учетом поворота облучателей (УБЛ ниже -10 дБ) находится в диапазоне 13-16,5 ГГц.

На рисунке 2.29 показаны ДН в азимутальной плоскости при разном повороте облучателя на частоте 16 ГГц. На рисунке 2.30 показаны ДН в объеме.

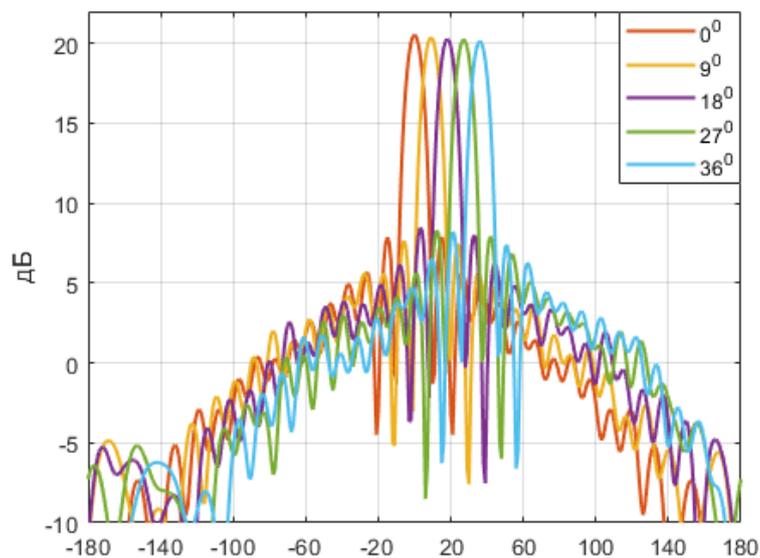


Рис. 2.29. ДН в азимутальной плоскости на частоте 16 ГГц при повороте облучателя

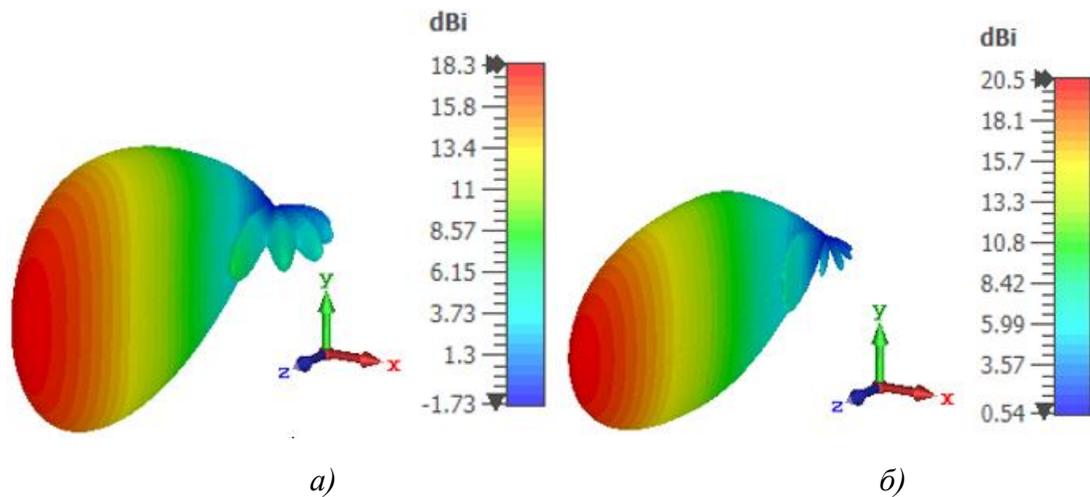


Рис. 2.30. Объемные ДН на частоте 13 ГГц (а) и 16 ГГц (б)

Таким образом, в данном разделе подразделе показана возможность создания цилиндрических линз Лüneберга на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. Исследования влияния дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Лüneберга, показали, что из-за наличия дисперсии у метаматериалов, фокусное расстояние зависит от частоты. По этой причине антенная система на основе такой линзы работает в узком диапазоне частот, который может отличаться от расчетного.

2.4. Полусферическая метаматериальная линза из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров

В данном разделе разработана методика, позволяющая минимизировать анизотропию в печатных метаматериалах, а также разработана широкополосная антенная система с двумя ортогональными поляризациями для нужд сотовой связи, позволяющая осуществлять полноазимутальное сканирование или секторное сканирование с электронным управлением луча [135].

2.4.1. Эффективные параметры метаматериала, имеющего форму иерусалимского креста с впаянным в центре металлическим стержнем

В данном подразделе разработана методика, позволяющая минимизировать анизотропию в печатных метаматериалах. Исследованы эффективные параметры метаматериала на основе печатных иерусалимских крестов с впаянными поперечными металлическими штырями, позволяющими минимизировать анизотропию.

Поскольку антенная система должна поддерживать две ортогональные поляризации, то в качестве ячейки периодической структуры метаматериала используются вытравленные на тонком стеклотекстолите (FR-4) толщиной 0,2 мм иерусалимские кресты с впаянными в центре поперечными металлическими штырями. Для придания механической жесткости концы штырей опираются (припаяны к площадкам) на печатные платы из стеклотекстолита (FR-4) толщиной 0,2 мм. На рисунке 2.31 показан внешний вид ячейки метаматериала [136].

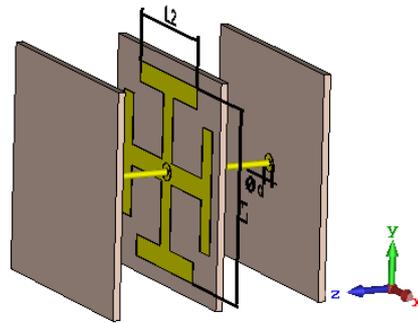


Рис. 2.31. Внешний вид ячейки метаматериала на основе иерусалимских крестом с впаянным в центре штырьком

Поперечные металлические штырьки предназначены для минимизации анизотропии. У планарной структуры иерусалимских крестов компоненты ϵ_{xx} и ϵ_{yy} тензора эффективной диэлектрической проницаемости ϵ имеют одинаковые значения в силу симметрии. Однако для реализации полусферической линзы на двух ортогональных поляризациях необходимо,

чтобы значение компоненты ϵ_{zz} было таким же (или близким по значению) к указанным компонентам.

Геометрические параметры исследуемой структуры: размер ячейки метаматериала 6,4 мм; период расположения печатных плат вдоль оси oz 3,1 мм. Параметры, влияющие на значения эффективных параметров: длина крестов $L1$, длина наконечников крестов $L2$, диаметр штырька D , диаметр металлических площадок d . Для учета технологической погрешности позиционирования при сборке линзы, радиус металлических площадок должен превышать радиус штырька минимум на 0,15 мм. Для вычисления эффективных параметров используются соотношения (2.1)-(2.5).

На рисунке 2.32 показаны частотные зависимости действительной и мнимой части ϵ_{zz} ($Re(\epsilon_{zz})$ и $Im(\epsilon_{zz})$) от частоты при разных значениях D и d . Влияние длин крестов $L1$ и $L2$ пренебрежимо мало на z -компоненты эффективных параметров. Частотные зависимости компоненты μ_{zz} ($Re(\mu_{zz})$ и $Im(\mu_{zz})$) тензора эффективной магнитной проницаемости μ при разных D и d приведены на рисунке 2.33.

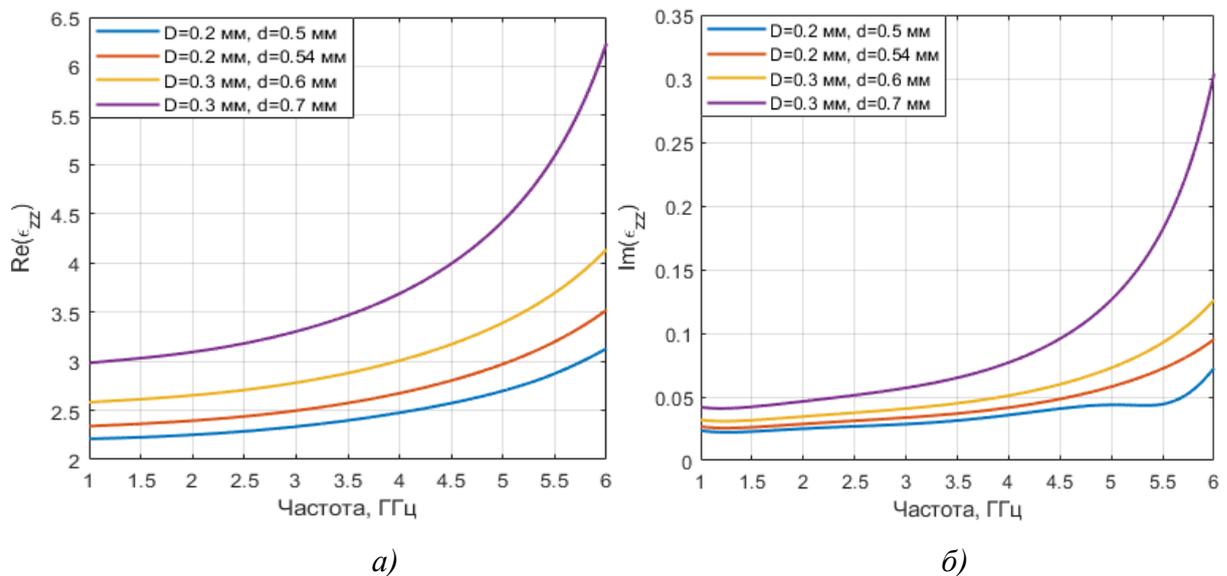


Рис. 2.32. Частотная зависимость $Re(\epsilon_{zz})$ и $Im(\epsilon_{zz})$ при разных значениях D и d

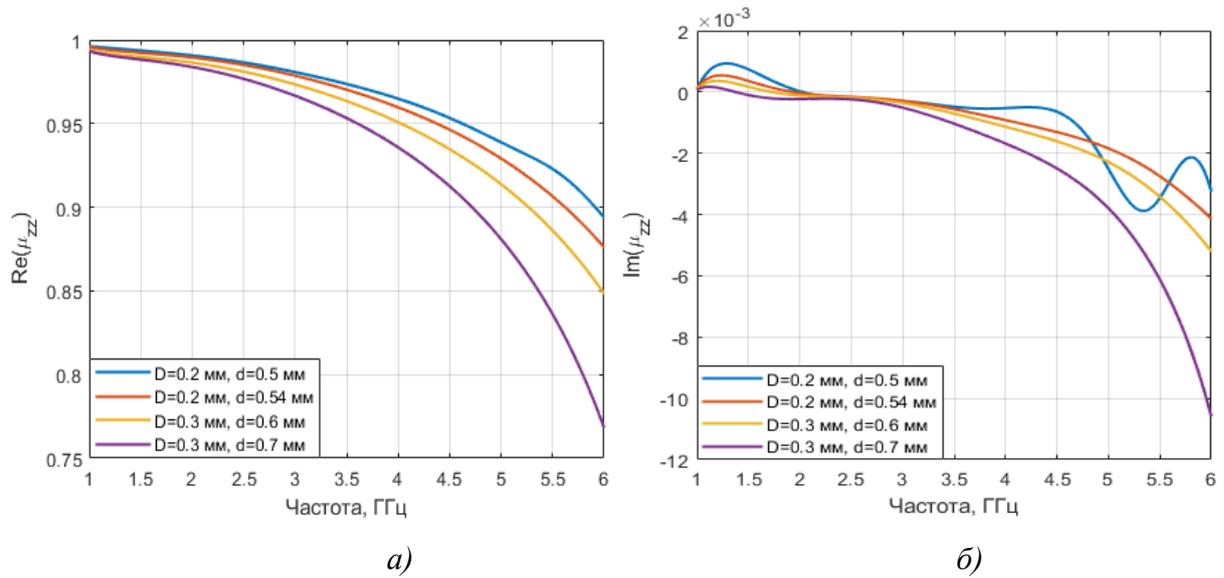


Рис. 2.33. Частотная зависимость $Re(\mu_{zz})$ и $Im(\mu_{zz})$ при разных значениях D и d

Из полученных зависимостей следует, что ячейка метаматериала (рисунок 2.31) обладает дисперсией. При увеличении D или d : возрастает дисперсия и потери, увеличиваются значения $Re(\epsilon_{zz})$, уменьшаются значения $Re(\mu_{zz})$;

Рассмотрим влияние длин $L1$ и $L2$ на x -компоненты эффективных параметров (в силу симметрии y -компоненты имеют такие же значения). На рисунке 2.34 показаны частотные зависимости $Re(\epsilon_{xx})$ и $Im(\epsilon_{xx})$, а на рисунке 2.35 – частотные зависимости $Re(\mu_{xx})$ и $Im(\mu_{xx})$ при разных значениях $L1$ и $L2$.

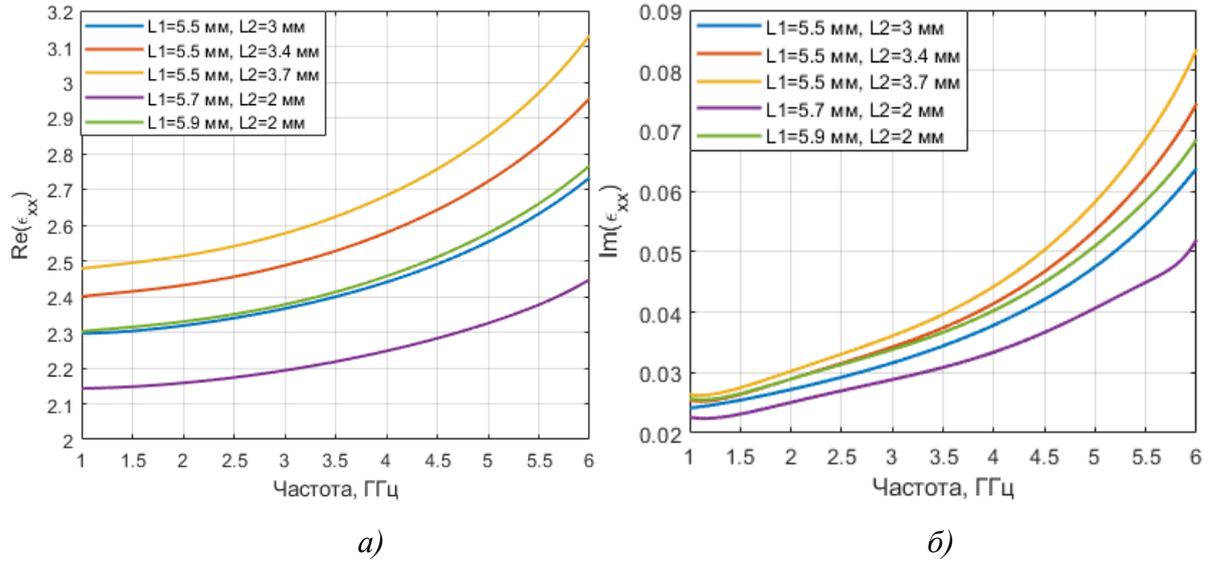


Рис. 2.34. Частотная зависимость $Re(\mu_{xx})$ и $Im(\mu_{xx})$ при разных значениях $L1$ и $L2$

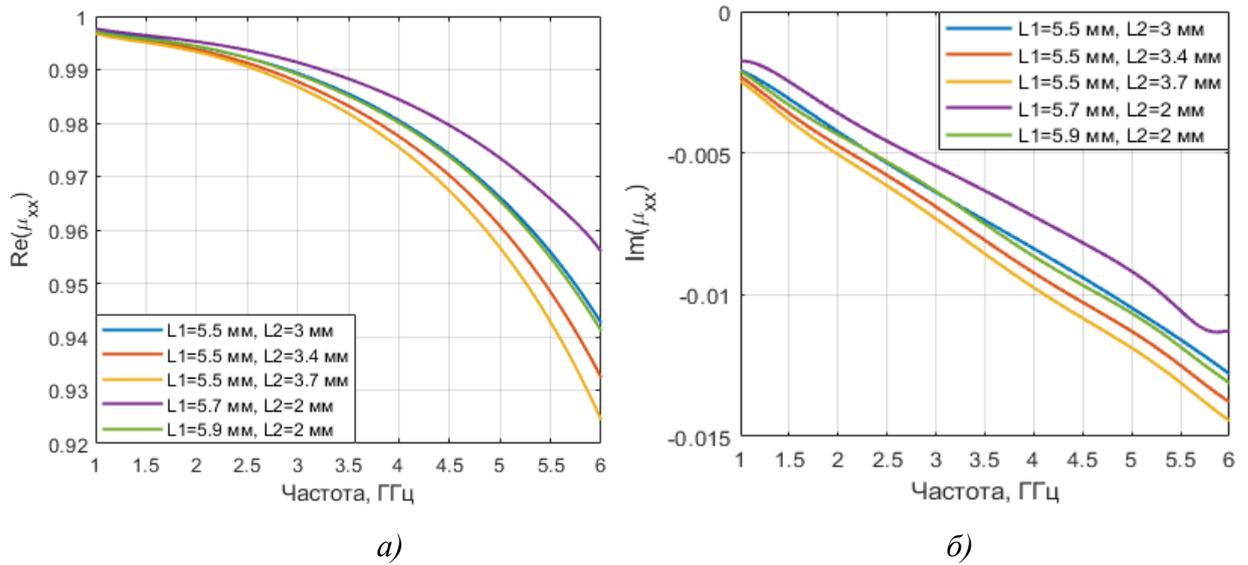


Рис. 2.35. Частотная зависимость $Re(\mu_{xx})$ и $Im(\mu_{xx})$ при разных значениях $L1$ и $L2$

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении $L1$ или $L2$ изменение x -компонент тензоров ϵ и μ аналогично изменению z -компонент при увеличении D или d (рисунок 2.32 и рисунок 2.33).

На основе полученных результатов для создания линзовой антенны выбраны геометрические размеры: $L1=5,5$ мм; $L2=3,5$ мм; $D=0,2$ мм; $d=0,5$ мм. На рисунке 2.36 показаны частотные зависимости ϵ_{xx} и ϵ_{zz} .

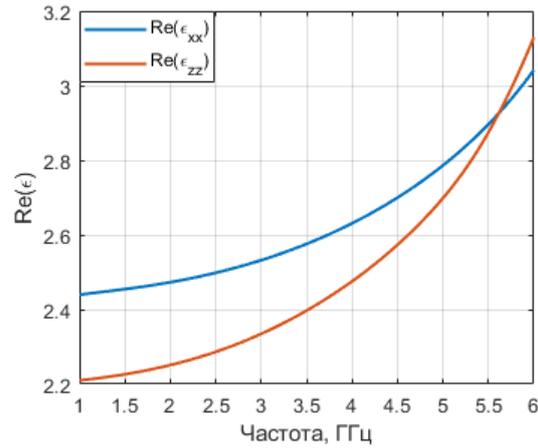


Рис. 2.36. Частотная зависимость $Re(\epsilon_{xx})$ и $Re(\epsilon_{zz})$

Таким образом, суть разработанной методика, позволяющей минимизировать анизотропию, заключается в использовании поперечных металлических штырей, впаянных перпендикулярно печатной плате, которые позволяют приблизиться к симметричной конструкции ячейки метаматериала. Из анализа результатов, полученных в ходе исследований эффективных параметров метаматериала на основе печатных иерусалимских крестов с впаянными поперечными металлическими штырями, выбраны геометрические параметры периодической структуры, позволяющие минимизировать анизотропию.

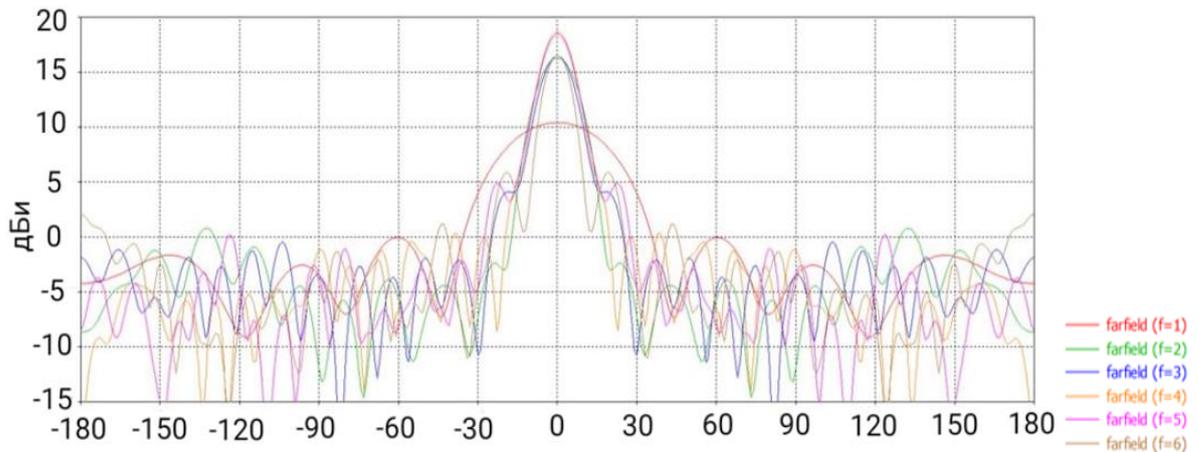
2.4.2. Многолучевая антенная система на основе полусферической метаматериальной линзы

На основе результатов, полученных в разделе 2.4.1, разработана полусферическая линза с диаметром основания 480 мм и высотой 230 мм. На рисунке 2.37 изображена исследуемая полусферическая линза [137].

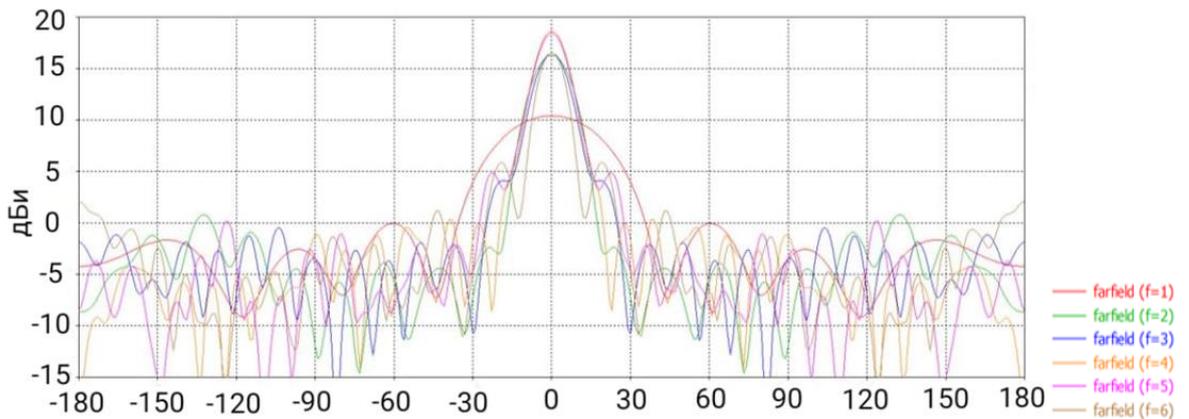


Рис. 2.37. Полусферическая метаматериальная линза

Для возбуждения линзы используется система сверхширокополосных вибраторов с двумя ортогональными поляризациями, описанная в работе [139]. Обозначим вертикальную поляризацию – поляризацию, у которой вектор напряженности электрического поля параллелен металлическим штырькам. Горизонтальной поляризацией – поляризацию с вектором напряженности электрического поля параллельным печатным платам. На рисунке 2.38 приведены ДН в азимутальной плоскости исследуемой антенной системы.



а) вертикальная поляризация



б) горизонтальная поляризация

Рис.2.38. ДН в азимутальной плоскости

При вертикальной поляризации:

– в диапазоне 1-5 ГГц КНД возрастает 12,3 дБи до 18,8 дБи, имея максимальное значение на 5 ГГц, на частотах свыше 5 ГГц КНД убывает;

– УБЛ ниже -10 дБ в диапазоне 1-6 ГГц.

При горизонтальной поляризации:

– в диапазоне 1-4,7 ГГц КНД возрастает от 11,3 дБи до 21,1 дБи, имея максимальное значение на 4,7 ГГц, на частотах выше 4,7 ГГц КНД снижается;

– УБЛ ниже -10 дБ в диапазоне 1-4,7 ГГц, на частотах свыше 4,7 ГГц УБЛ превышает -10 дБ.

ДН в объеме на 4 ГГц показана на рисунке 2.39.

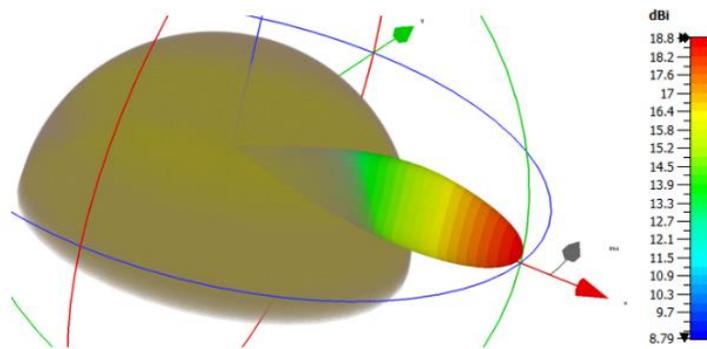


Рис. 2.39. ДН на частоте 4 ГГц

Из-за большого числа используемых печатных плат из стеклотекстолита, а также из-за наличия потерь в используемом метаматериале, рассмотрим коэффициент полезного действия (КПД) антенной системы, а также полный КПД, учитывающий потери при согласовании (рисунок 2.40).

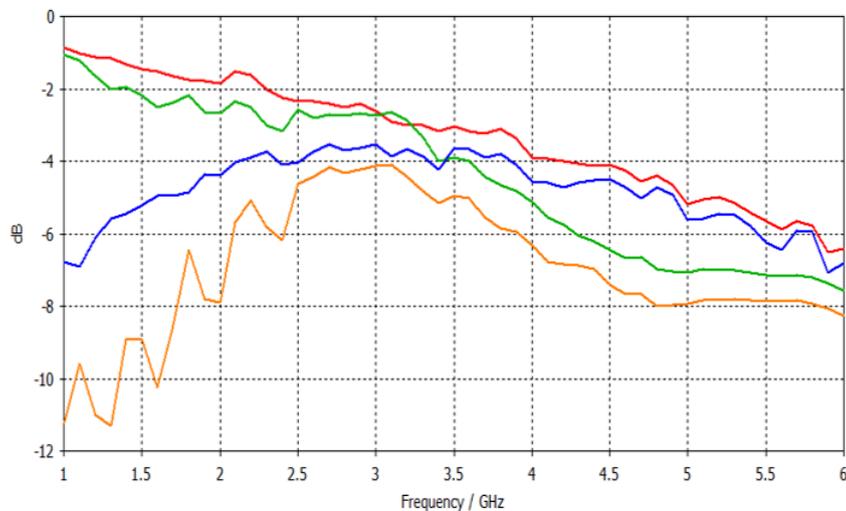


Рис. 2.40. Частотная зависимость КПД антенной системы: красная линия – при вертикальной поляризации; зеленая линия – при горизонтальной

поляризации; синяя линия – полный при вертикальной поляризации; желтая линия – полный при горизонтальной поляризации

КПД антенной системы убывает с ростом частоты. На частотах ниже 3 ГГц КПД при вертикальной больше, чем при горизонтальной (отличие не более 0,5 дБ). На частотах выше 3 ГГц КПД для обеих поляризаций ниже –3 дБ. Полный КПД антенной системы не превосходит –3 дБ для обеих поляризаций в диапазоне 1-6 ГГц.

Таким образом, в данном разделе исследованы эффективные параметры метаматериала на основе иерусалимских крестов с впаянным в центре металлическим штырьком. Подбор геометрических параметров позволил уменьшить анизотропию.

Исследована возможность построения полноазимутальной МЛА на основе полусферической метаматериальной линзы на двух ортогональных поляризациях. Рабочая полоса антенной системы 1-4,7 ГГц. Однако на частотах выше 3 ГГц значительно возрастают потери.

2.5. Сферическая линза Люнеберга из параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями

В [64] показано, что планарные метаматериалы (периодические структуры, вытравленные на печатных платах) обладают анизотропией из-за несимметричной конструкции. Один из возможных путей решения данной проблемы описан в разделе 2.4: использование дополнительных металлических штырей, впаянных перпендикулярно печатных плате. Однако такое техническое решение значительно усложняет конструкцию, а также не позволяет реализовать объемный градиентно-изменяющийся n , необходимый для создания сферической линзы Люнеберга.

В данном разделе рассмотрена возможность реализации сферической линзы Люнеберга для нужд сотовой связи (диапазон 1-2 ГГц) небольших электрических размеров (диаметр линзы не превышает двух длин волн) на

основе параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями [139]. Для трехмерного электромагнитного моделирования используется метод конечного интегрирования Вейланда [129-131].

Сферическая линза состоит из набора диэлектрических дисков (стеклотекстолит FR-4 толщиной 0,05 мм), являющихся сечениями шара. В качестве периодической структуры (рисунке 2.41) используются вертикальные металлические проводники, вытравленные на стеклотекстолите.

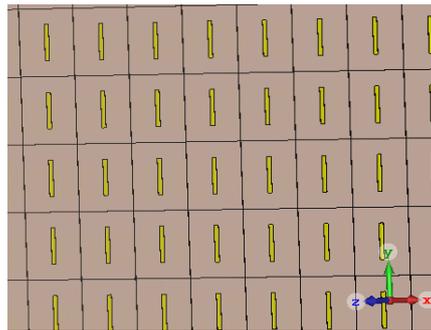


Рис. 2.41 Периодическая структура на основе вертикальных металлических проводников

Такая периодическая структура поддерживает только линейную поляризацию, у которой вектор напряженности электрического поля параллелен проводникам. При этом значения $Re(\mu_{эфф})$ близки к единице. Необходимо отметить, что подобные структуры широко применяются при создании селективных поверхностей [62].

В [62] показано, что для уменьшения дифракционных максимумов в периодической структуре необходимо выбирать небольшой период расположения проводников. Для того, чтобы ячейку метаматериала можно было считать изотропной средой, необходимо, чтобы размер резонансных элементов был меньше одной десятой длины волны. Поэтому период расположения металлических проводников вдоль осей ox , oy , oz составляет 13 мм, ширина проводников – 1 мм. Изменение длины проводников приводит к изменению значений $\varepsilon_{эфф}$. Это можно объяснить следующим образом. В [62] показано, волновое сопротивление ячейки может заменяться эквивалентными

сосредоточенными параметрами (метод эквивалентных схем (или метод квазистатического приближения). Изменение длины металлических проводников (изменение величины зазора между металлическими концами) приводит к изменению значений колебательного контура, следовательно, и к изменению значений $\varepsilon_{эфф}$ (рисунок 2.42).

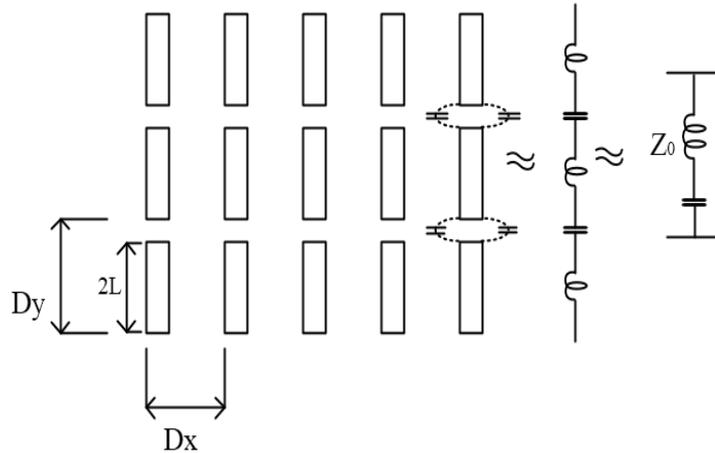


Рис. 2.42 Эквивалентная схема периодической структуры на основе вертикальных металлических проводников

Поскольку при создании линзовых антенн геометрические размеры метаматериала фиксируются на определенную частоту, а для натурального эксперимента легче измерить S -параметры прямоугольного волновода, то для расчета значений $n_{эфф}$ используется методика, основанная на измерении фазы S_{21} . Для этого исследуемая периодическая структура помещается в прямоугольный волновод, возбуждаемый волной H_{10} . Геометрические размеры волновода: длина – 195 мм, ширина – 195 мм, высота – 91 мм. Длина волновода близка к длине волны на 1,7 ГГц, а ширина волновода обеспечивает режим работы с волной H_{10} . На рисунке 2.43 показан внешний вид волновода с исследуемой структурой.

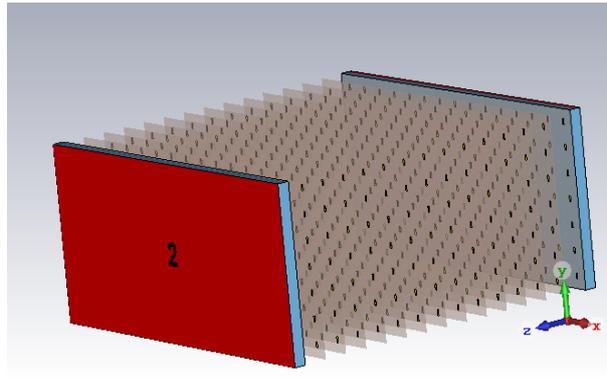


Рис. 2.43 Прямоугольный волновод с периодической структурой

Суть метода поясним на конкретном примере. На рисунке 2.44 показана частотная зависимость фазы S_{21} .

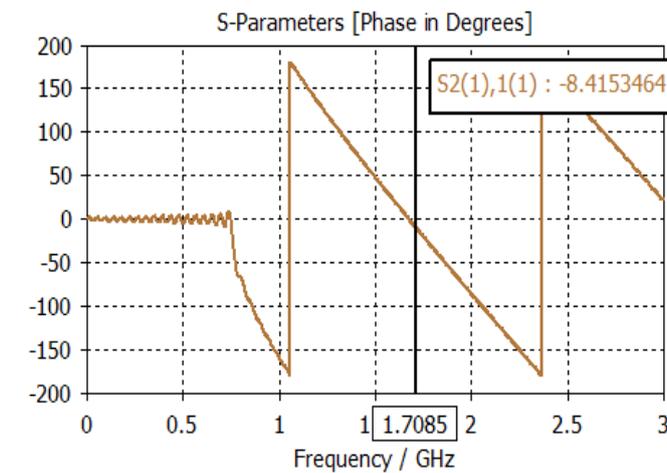


Рис. 2.44. частотная зависимость фазы S_{21}

Из приведенной зависимости следует, что на частоте 1,7 ГГц значение фазы S_{21} близко к нулю. Когда по длине волновода укладывается одна длина волны, то величина фазы равна 2π . (значение фазы S_{21} равно нулю):

$$\beta L = 2\pi - \arg(S_{21}), \quad (2.7)$$

$$\beta = 2\pi / \lambda_g, \quad (2.8)$$

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2.9)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad (2.10)$$

где: $\arg(S_{21})$ – величина фазы S_{21} ; L – длина волновода, λ – длина волны свободного пространства; λ_g – длина волны H_{10} ; a – ширина волновода; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего волновод; n – коэффициент преломления.

Подставляя (2.8) в (2.7) получаем значение длины волны λ_g . На основе полученного значения λ_g рассчитаем величину $\varepsilon_{эфф}$ согласно (2.9), а коэффициент преломления рассчитывается согласно (2.10). На рисунке 2.45 показана зависимость n от величины зазора (z), построенная на частоте 1,7 ГГц.



Рис. 2.45 Зависимость коэффициента преломления от зазора

Ниже приведена аппроксимированная зависимость:

$$n(z) = 0,957867 + 0,622499 \frac{1}{z} - 0,82097 \frac{1}{z^2} + 0,608135 \frac{1}{z^3} - 0,238754 \frac{1}{z^4} + 0,050156 \frac{1}{z^5} - 0,005235 \frac{1}{z^6} + 0,000208 \frac{1}{z^7} \quad (2.10)$$

На основе полученной зависимости создана сферическая линза Люнеберга радиусом 100 мм. В качестве облучателя используется полуволновой вибратор с рефлектором. На рисунке 2.46 показан внешний вид исследуемой антенной системы.

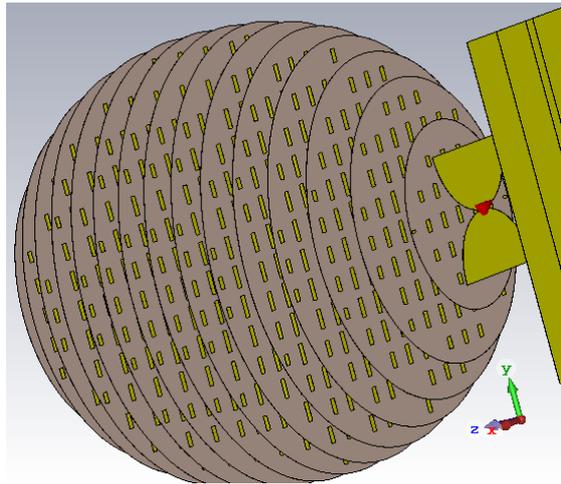


Рис. 2.46. Сферическая линза Люнеберга с облучателем

На рисунке 2.47 показаны ДН в азимутальной плоскости, а на рисунке 2.48 приведена частотная зависимость КНД при разных значениях угла поворота облучателя относительно центра линзы в азимутальной плоскости. Также на рисунке 2.48 показана теоретическая частотная зависимость синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48].

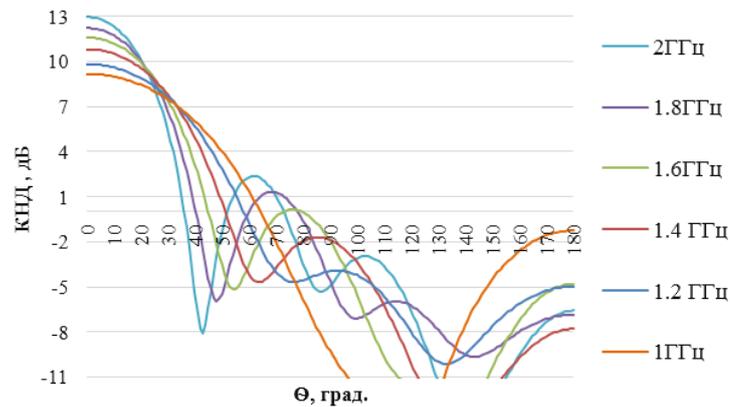


Рис. 2.47. ДН в азимутальной плоскости

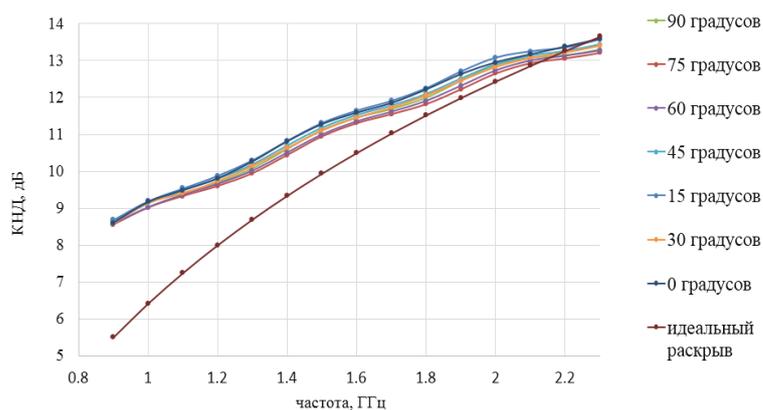
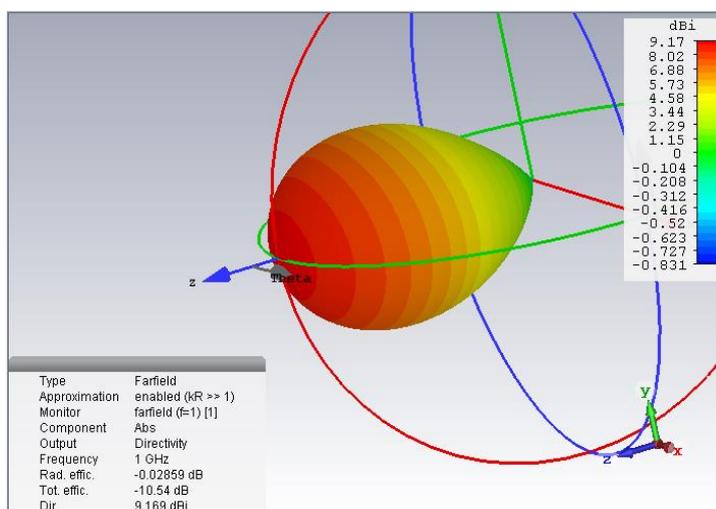


Рис. 2.48. Частотная зависимость КНД при повороте облучателя в азимутальной плоскости

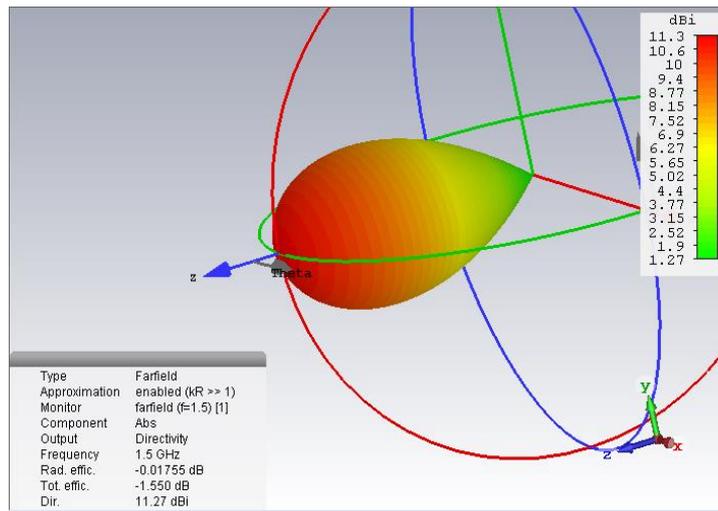
Анализ результатов численного моделирования показал:

- рабочая полоса линзы по УБЛ ниже -10 дБ составляет 0,9-2 ГГц;
- линза работает и при малых значениях электрического диаметра, даже меньше одной длины волны;
- в диапазоне 0,9-2,2 ГГц КНД возрастает от 8,6 до 13,5 дБи, при этом в нижней части частотного диапазона КНД превышает теоретическое значение не более, чем на 3 дБ, а на частотах свыше 2 ГГц КНД линзы меньше расчетного;
- величина КНД практически не изменяется при повороте облучателя в азимутальной плоскости (отличие составляет менее 0,5 дБ).

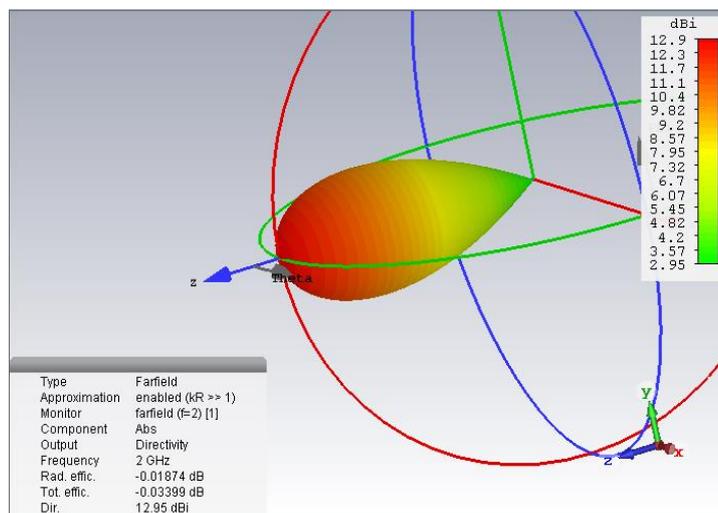
На рисунке 2.49 показаны ДН в объеме.



а) 1 ГГц



б) 1,5 ГГц



в) 2 ГГц

Рис. 2.49. Объемные ДН сферической линзы Лунеберга

Таким образом, в данном разделе исследована возможность создания сферической линзы Лунеберга на основе печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. Показано, что линза работает и при малых значениях электрического диаметра, даже меньше одного длины волны.

2.6. Разработка и исследование двухкоординатной МЛА на основе многослойной печатной линзы

МЛА, созданные на основе плоских печатных линз, имеют небольшую массу и низкую стоимость, а плоский профиль линзы без выступающих частей

делает такие антенные системы привлекательными для использования в системах связи различного назначения: системы сотовой или спутниковой связи; гражданские или военные радары; мобильные терминалы спутниковой связи (и т.д.) [1].

В этом разделе разработана и исследована МЛА линзового типа с сектором сканирования $\pm 10^0$ в двух плоскостях для систем сотовой связи диапазона 5-G (центральная частота 28 ГГц) на основе планарной печатной линзы. В разработанной антенной системе обеспечивается развязка по поляризации между облучателем и линзой – антенная система имеет круговую поляризацию, а облучатели линзы имеют линейную поляризацию [140].

Многослойная печатная плата линзы имеет четыре слоя:

1. патч-антенны теневой стороны линзы;
2. полосковый квадратурный (90^0) делитель мощности, у которого проводники свернуты в кольцо для обеспечения компактности размеров (подобный делитель описан в [141]);
3. полосковые линии задержки (50 Ом), имеющие форму полукруга или дуги (данная форма была выбрана для удобства проектировки);
4. патч антенны облучаемой стороны линзы.

Таким образом, печатная линза имеет 3 металлических слоя, выполняющих функцию заземления (слои заземления соединены металлическими штырьками). Для контактного соединения элементов, расположенных в разных слоях многослойной печатной платы, используются штырьки (пины). Подобный способ соединения описан в разделе 1.4 и схематично показан на рисунке 1.25. В многослойной печатной плате используется высокочастотный диэлектрик марки Rogers 3003 с диэлектрическими параметрами: $\epsilon_r = 3$ и $tg(\delta) = 0,001$.

Рассмотрим подробнее назначение и соединение слоев. Патч-антенны печатной АР (как на теневой, так и облучаемой стороны линзы) имеют круглую форму с двумя точками запитки. Геометрические параметры патчей были рассчитаны согласно [142]. В [142] указано, что для реализации круговой

поляризации необходимо обеспечить разность фаз 90° на двух входах патч-антенны. Для этого используется полосковый квадратурный (90°) делитель мощности, расположенный в 2 слое, к выходам которого подключен круглый патч теневой стороны линзы (1 слой). Расчет геометрических параметров квадратурного (90°) делителя мощности осуществлялся согласно [141]. К каждому входу квадратурного делителя подключаются полосковые линии задержки (50 Ом), расположенные в 3 слое, подключенные к патчу облучаемой стороны линзы (4 слой). Благодаря такому техническому решению, патчи облучаемой стороны имеют линейную поляризацию (вертикальную или горизонтальную), а патчи теневой – круговую. На рисунке 2.50 показаны слои многослойной печатной платы линзы (диэлектрик и соединительные полосковые линии (50 Ом) не показаны). Суммарная толщина печатной линзы составляет $0,12\lambda_0$ (λ_0 – длина волны на 28 ГГц).

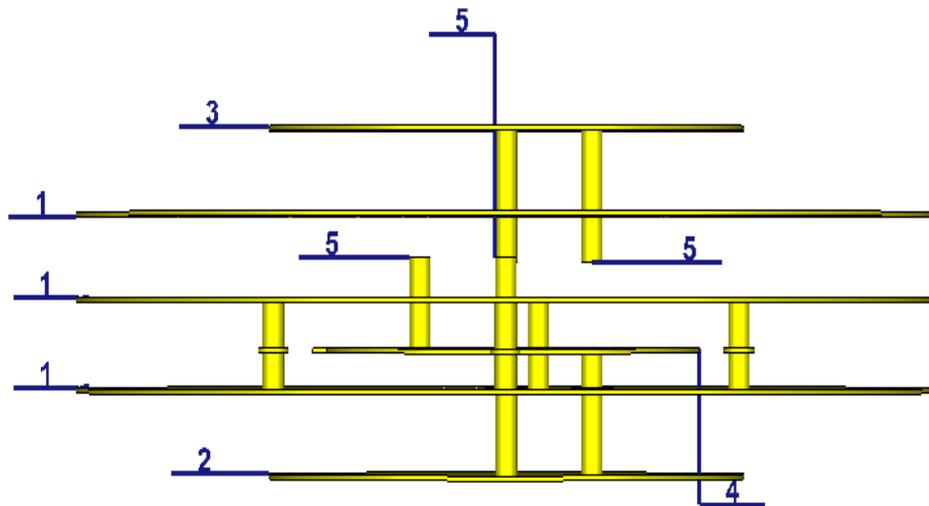


Рис. 2.50. Слои многослойной печатной линзы:

- 1) слои заземления; 2) патч теневой стороны; 3) патч облучаемой стороны;
- 4) квадратурный делитель 90° ; 5) места подключения линий задержек

Фокусное расстояние и диаметр исследуемой линзы равны $8,5\lambda_0$. Излучающие элементы АР расположены в узлах треугольной сетки, шаг которой выбирается, исходя из следующих предположений. Поскольку излучающая поверхность исследуемой антенной системы состоит из

дискретных элементов (круглые патчи, расположенные в узлах треугольной сетки), то суммарная эффективная площадь антенны будет равна сумме эффективных площадей дискретных элементов (патчей). Поскольку в АР используется треугольная сетка, то целесообразно эффективную площадь патча считать круглой. Тогда радиус эффективной площади ($r_{эфф}$) излучения рассчитывается согласно [143]:

$$D = 10^{D'/10}, \quad (2.11)$$

$$S_{эфф} = \frac{\lambda_0^2 D}{4\pi}, \quad (2.12)$$

$$r_{эфф} = \sqrt{S_{эфф} / \pi} \quad (2.13)$$

где: D' – величина КНД, выраженная в дБи; $S_{эфф}$ – эффективная площадь излучения.

В [142] указано, что КНД патч-антенны находится в пределах 5-7 дБи (в расчетах считаем КНД патча равным 5 дБи). Шаг треугольной антенной сетки равен удвоенному значению $r_{эфф}$. При этом соседние элементы должны располагаться так, чтобы окружности их эффективных площадей антенн имели, по крайней мере одну общую точку (касались друг друга или имели небольшое пересечения). Исходя из указанных предположений, а также соотношений (2.11)-(2.13) шаг треугольной сетки антенной решетки составляет $0,581\lambda_0$.

Расчет длин полосковых линий задержки проводился согласно [141, 144]. На рисунке 2.51 показан фрагмент линзы без диэлектрика и слоев заземления

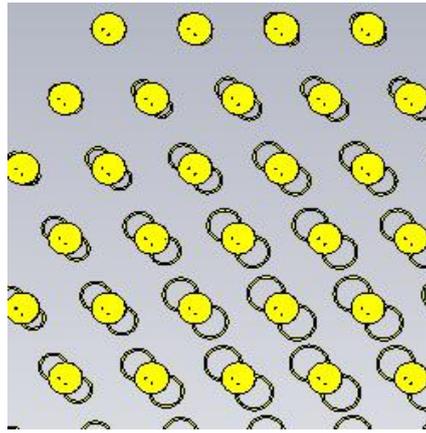
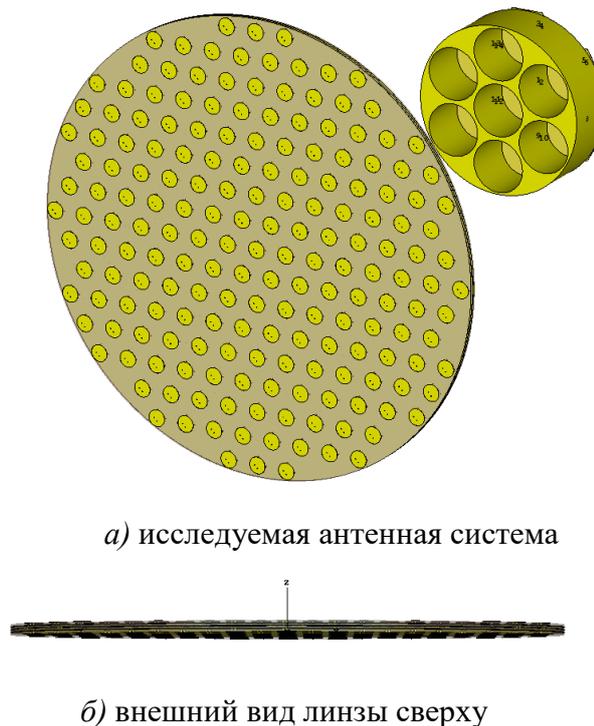


Рис. 2.51. Фрагмент печатной линзы без диэлектрика и слоев заземления

На рисунке 2.52(а) показана печатная линза с семью облучателем. В качестве облучателей используются круглые патчи (такие же, как и в печатной линзе), накрытые металлической пластиной с отверстиями. На рисунке 2.52(б) показана печатная линза сверху.



а) исследуемая антенная система

б) внешний вид линзы сверху

Рис. 2.52. МЛА на основе печатной линзы

Для численного электромагнитного моделирования используется метод Вейланда [129-131]. На рисунке 2.53 показаны ДН в объеме на частоте 28 ГГц.

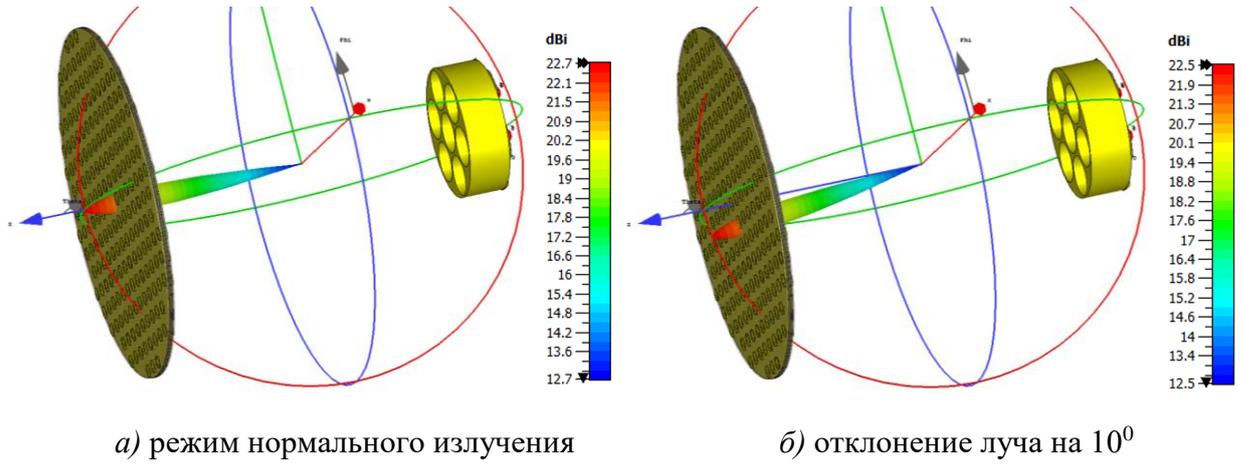


Рис. 2.53. Объемные ДН на частоте 28 ГГц

На рисунке 2.54 показаны ДН в азимутальной плоскости на частоте 28 ГГц. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу приведена на рисунке 2.55.

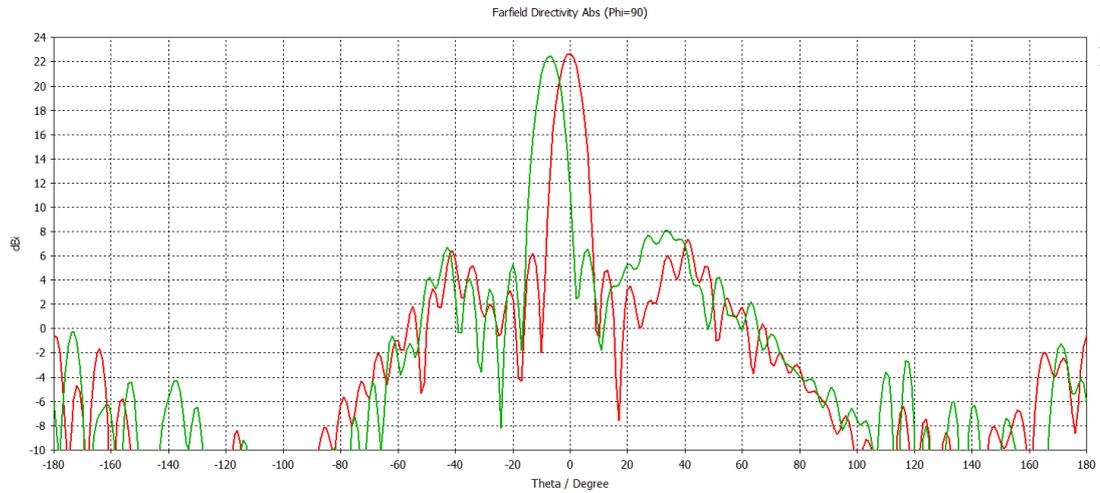


Рис. 2.54. ДН в азимутальной плоскости на частоте 28 ГГц

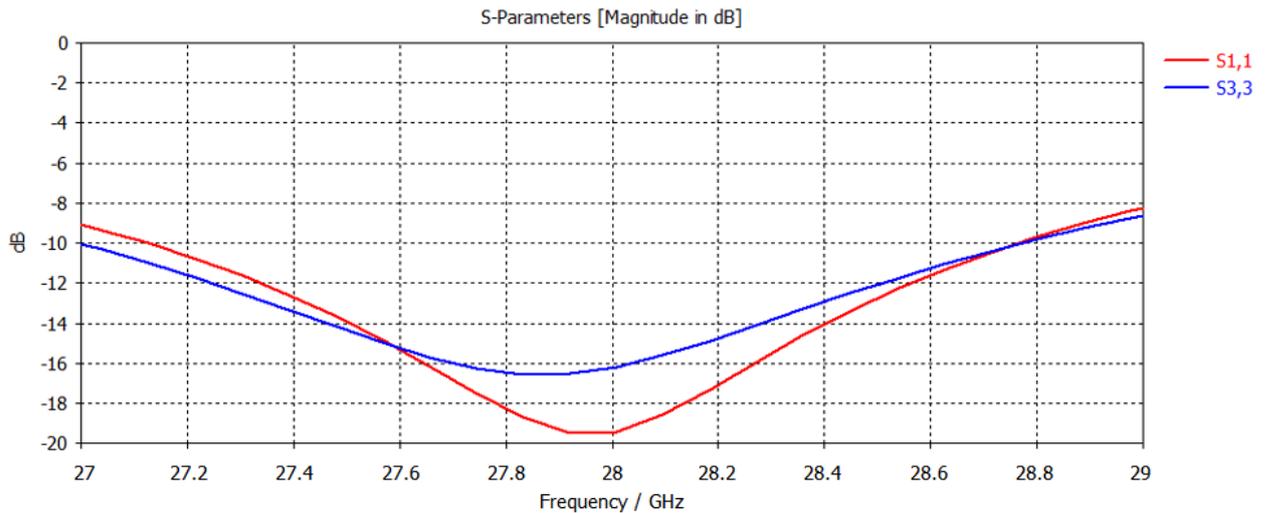


Рис. 2.55. Частотная зависимость коэффициента отражения по входу: красная линия соответствует центральному облучателю, синяя – боковому

Оценим КПД исследуемой антенной системы, а также КПД, учитывающий потери на согласование (рисунок 2.56)

Из-за большого числа используемых печатных плат из стеклотекстолита, а также из-за наличия потерь в используемом метаматериале, рассмотрим коэффициент полезного действия (КПД) антенной системы, а также полный КПД, учитывающий потери при согласовании (рисунок 2.56).

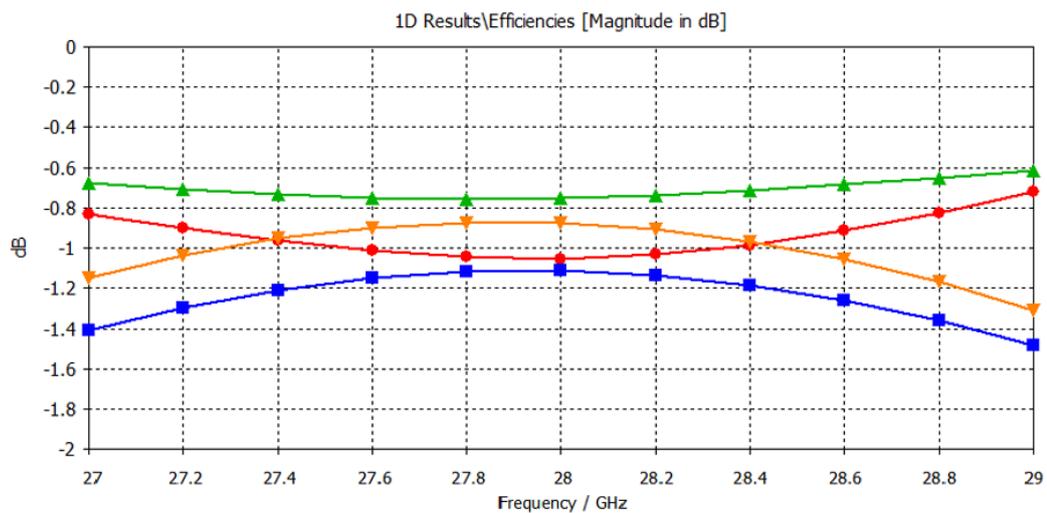


Рис. 2.56. Зависимость КПД от частоты: красная линия – центральный облучатель; зеленая линия – боковой облучатель; синяя линия – полный КПД центрального облучателя; желтая линия – полный КПД бокового облучателя

Из анализа полученных результатов следует:

- сектор сканирования антенной системы $\pm 10^0$;
- КНД в режиме нормального излучения на центральной частоте (28 ГГц) равен 22,7 дБи, что на 5,5 дБ меньше КНД идеального синфазного равно-амплитудного раскрыва (КИП = 0,282);
- ширина ДН по уровню -3 дБ составляет 8^0 ;
- ширина рабочей полосы 7%;
- суммарные потери в антенной системе (с учетом согласования) не более 1,4 дБ во всем рабочем диапазоне

Таким образом, в настоящем разделе разработана МЛА для систем сотовой связи диапазона 5-G с сектором сканирования $\pm 10^0$ в двух плоскостях на основе планарной печатной линзы. Печатная линза обеспечивает развязку по поляризации – антенная система имеет круговую поляризацию, а облучатели линзы имеют линейную. Несмотря на сложную конструкцию (многослойная печатная палата тела линзы состоит из 4 слоев), МЛА имеет небольшие потери.

2.7. Выводы по второй главе

Подводя итоги исследований, проведенных во второй главе диссертации, перечислим полученные результаты.

1. На основе рассчитанных эффективных параметров метаматериала Н-образной структуры, были разработаны МЛА для систем спутниковой связи на основе цилиндрических линз (состоящих из параллельных печатных плат) следующих типов: однородная линза (фиксированный размер Н-образной структуры метаматериала), линза Люнеберга с фокусом на поверхности, линза Люнеберга с вынесенным фокусом.

2. Несмотря на наличие дисперсии у метаматериала, у однородной линзы фокус не перемещается при изменении частоты. Исследования направленных и частотных свойств показали, что электродинамические характеристики разработанной цилиндрической линзы близки к

характеристикам линзы, выполненной из однородного диэлектрика. Однако у метаматериальной линзы уже рабочая полоса и выше УБЛ, а при повороте облучателя ухудшаются направленные свойства из-за анизотропного метаматериала.

3. Показано, что из-за наличия дисперсии у метаматериалов, в цилиндрических линзах Люнеберга (как с фокусом на поверхности, так и с вынесенным фокусом) фокусное расстояние зависит от частоты. Это не позволяет реализовать широкополосную антенную систему на основе такой линзы. Стоит отметить, что рабочий диапазон линзы может отличаться от расчетного. Наличие анизотропии у метаматериалов в цилиндрических линзах Люнеберга приводит к ухудшению направленных свойств при повороте облучателя.

4. Разработана методика минимизации анизотропии в печатных метаматериалах. Для этого используются металлические штырьки, впаянные перпендикулярно печатной плате. Исследованы эффективные параметры метаматериала на основе печатных иерусалимских крестов с впаянными в центре поперечными металлическими штырьками, а также подобраны геометрические параметры, позволяющие минимизировать анизотропию.

5. Разработана широкополосная антенная система с двумя ортогональными поляризациями для нужд сотовой связи, позволяющая осуществлять полноазимутальное сканирование, на основе полусферической метаматериальной линзы с диаметром основания 480 мм и высотой 230 мм. В качестве ячейки периодической структуры используются иерусалимские кресты с впаянными в центре поперечными металлическими штырьками. Антенная система работает на 2 ортогональных поляризациях: горизонтальная (параллельная печатным платам) и вертикальная (перпендикулярная печатным платам) в диапазоне 1-4,7 ГГц. Из-за сложной конструкции и наличия большого числа печатных плат из тонкого стеклотекстолита (FR-4), антенная система обладает большими потерями.

6. Исследована возможность реализации сферической линзы Люнеберга небольших электрических размеров на основе печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала в виде вертикальных металлических проводников. Показано, что линза работает и при малых значениях электрического диаметра, даже меньше длины волны. Максимальный электрический размер линзы не превышает 2 длины волны.

7. Разработана МЛА для систем сотовой связи диапазона 5-G с сектором сканирования $\pm 10^\circ$ в двух плоскостях на основе многослойной печатной линзы, обеспечивающей развязку по поляризации – антенная система имеет круговую поляризацию, а облучатели линзы имеют линейную. На центральной частоте 28 ГГц: КНД составляет 22,7 дБи, КИП равен 0,282. Суммарные потери в антенной системе не более 1,4 дБ (с учетом согласования).

3. Сферические линзы Люнеберга

Сферические линзы Люнеберга позволяют формировать большое число ДН в широком секторе углов без искажений. При этом в каждом из сканирующих лучей сохраняются высокие значения КНД, КИП, а также низкие значения УБЛ. Стоит отметить, что сферические линзы Люнеберга позволяют создавать широкополосные МЛА.

Несмотря на свои достоинства, сферические линзы Люнеберга не находят широкого практического применения в системах связи различного назначения. Это обусловлено высокой стоимостью линз из-за сложной конструкции и большими габаритами линз. Современные достижения в области материаловедения, а также математический аппарат ТО, позволяют создавать линзы Люнеберга с различным профилем. В частности, в [89-93] описаны линзы, имеющие плоский профиль, позволяющий существенно уменьшить габариты антенной системы.

В настоящей главе исследованы направленные и частотные характеристики в широкой полосе МЛА на основе трехмерно-трансформированной линзы Люнеберга, имеющей плоский профиль. Разработана и исследована сферическая линза Люнеберга, техническая реализация которой возможна как с использованием технологий трехмерной печати, так и с использованием станка с числовым программным управлением (ЧПУ-станок). Проведен сравнительный анализ характеристик разработанной линзы с известной конструкцией, описанной в [70].

3.1. Исследование направленных и частотных свойств линзы Люнеберга, реализованной с использованием свойств трансформационной оптики

На основе теории ТО разработаны различные профили линзы Люнеберга, рассмотренные в подразделе 1.3.4. В работах [89-93] описана трехмерно-трансформированная линза Люнеберга с тонким плоским

профилем и вынесенным фокусом (ее внешний вид показан на рисунке 1.22(a)). Благодаря тонкому плоскому профилю, уменьшаются продольные габариты антенной системы, при этом сохраняется возможность многолучевого сканирования в азимутальной и угломестной плоскостях. Поэтому использование такой линзы является перспективным направлением для разработки МЛА систем связи различного назначения. Поэтому исследование возможности построения широкополосных МЛА на основе линзы Лüneберга с тонким плоским профилем является актуальной задачей.

В настоящем разделе исследованы направленные и частотные характеристики в широкой полосе трехмерно-трансформированной линзы Лüneберга с плоским профилем без привязки к конкретной технической реализации. При этом учитываются ограничения приближения, необходимые для технологической реализации [145, 146]. Для численного трехмерного электромагнитного моделирования используется метод Вейланда [129-131].

Можно сказать, что плоский профиль трансформированной линзы Лüneберга, предложенный в [89-93], получается в результате «сдавливания» (или «сжатия») исходной сферической линзы двумя плоскостями, перпендикулярными оси oy . (рисунок 3.1).

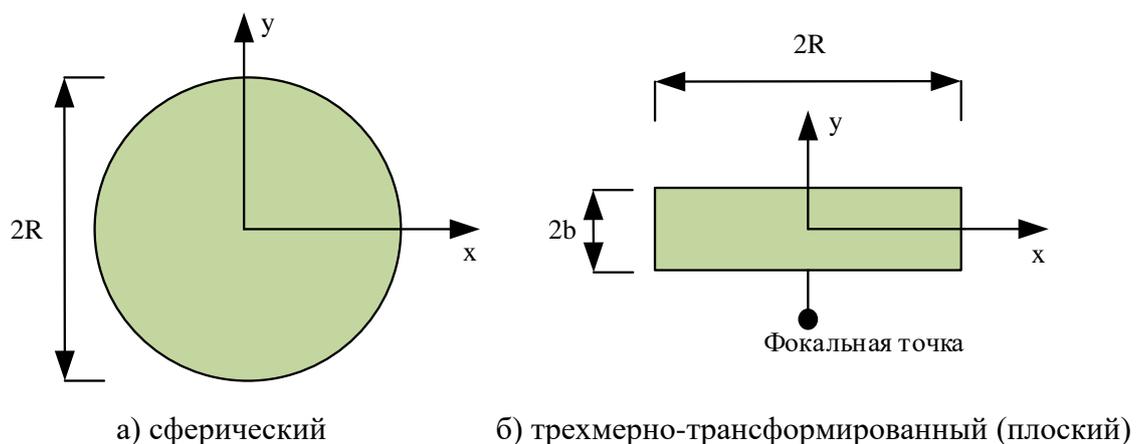


Рис. 3.1 Профили линзы Лüneберга

При разработке плоского профиля линзы используется координатное преобразование $(x, y, z) \rightarrow (x', y', z')$ [91, 92]:

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = \frac{yb}{\sqrt{R^2 - x^2}}, \\ z' = z \end{cases} \quad (3.1)$$

где: b и R – геометрические параметры линзы, указанные на рисунке 3.1.

Расчет тензоров ε' и μ' осуществляется с использованием формулы (1.9) при координатном преобразовании (3.1). Поскольку технически реализовать материал с заранее заданной анизотропией чрезвычайно сложно, то рассчитанные тензоры приводятся к диагональной форме [91, 92]. Подробное описание процедуры преобразований содержится в [91, 92].

Для технической реализации плоского профиля трансформированной линзы вводятся определенные ограничения и приближения.

1. Конструкция плоской линзы ориентирована на диэлектрический профиль – тензор μ' приравнивается к единичной диагональной матрице. Данное упрощение увеличит фокусное расстояние и несколько ухудшит характеристики антенной системы в режиме сканирования, однако позволит значительно облегчить техническую реализацию линзы.

2. Влияние компоненты ε_{yy}' тензора ε' на направленные характеристики линзы незначительно. Поэтому при технической реализации ее не учитывают.

3. Значения компонент ε_{xx}' и ε_{zz}' тензора ε' относительно исходных координат (x, y, z) рассчитываются согласно [91, 92]:

$$\varepsilon_{xx}' = \varepsilon_{zz}' = \sqrt{R^2 - x^2} \left(2 - \frac{x^2 + y^2}{R^2} \right) / b \quad (3.2)$$

4. Из соотношения (3.2) следует, что ближе к краю линзы образуются пространственные области, в которых значения ε_{xx}' и ε_{zz}' меньше единицы. Поскольку фокусировка плоской падающей волны в линзе происходит в областях с «высокими значениями» коэффициента преломления, за исключением волн, падающих под большим углом, то минимальное значение

ε_{xx}' приравнивается к единице без существенного влияния на направленные характеристики антенной системы [91, 92].

Радиус исследуемой линзы равен 23,1 мм, толщина составляет 7,7 мм [90]. Такие размеры выбраны для работы антенной системы в диапазоне 5-G, а также, чтобы диаметр линзы был кратен минимум трем длинам волн. На рисунке 3.2 показано распределение ε_{xx}' в плоскости $x'o'y'$.

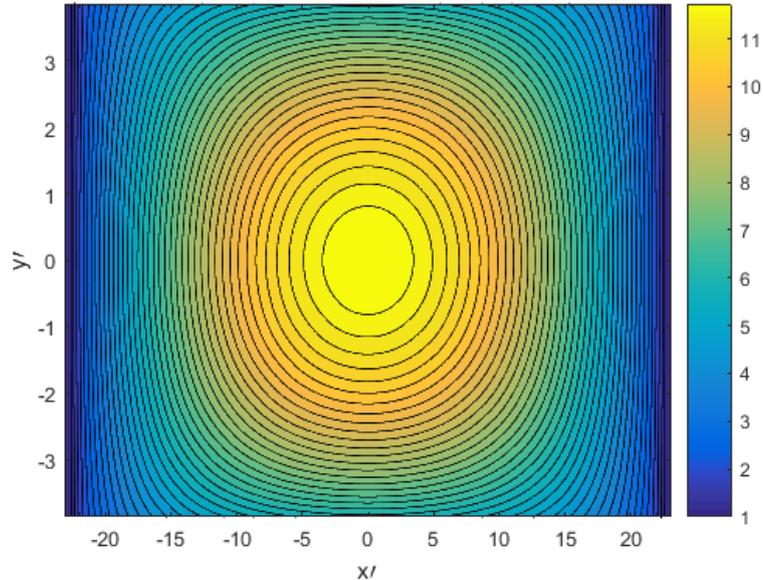


Рис. 3.2. Распределение ε_{xx}' в плоскости $x'o'y'$

Поскольку исследуются направленные и частотные характеристики трехмерно-трансформированной линзы Лüneберга без привязки к конкретной технической реализации, то модель линзы выполнена в виде двадцати вложенных друг в друга тел вращения, полученных в результате вращения дискретизированного распределения ε_{xx}' (плоскость $x'o'y'$) вокруг оси $o'y'$. Для дискретизации распределения ε_{xx}' используется оптимизированный метод [38]. На рисунке 3.3 показано дискретизированное распределение ε_{xx}' , а на рисунке 3.4 – профиль линзы.

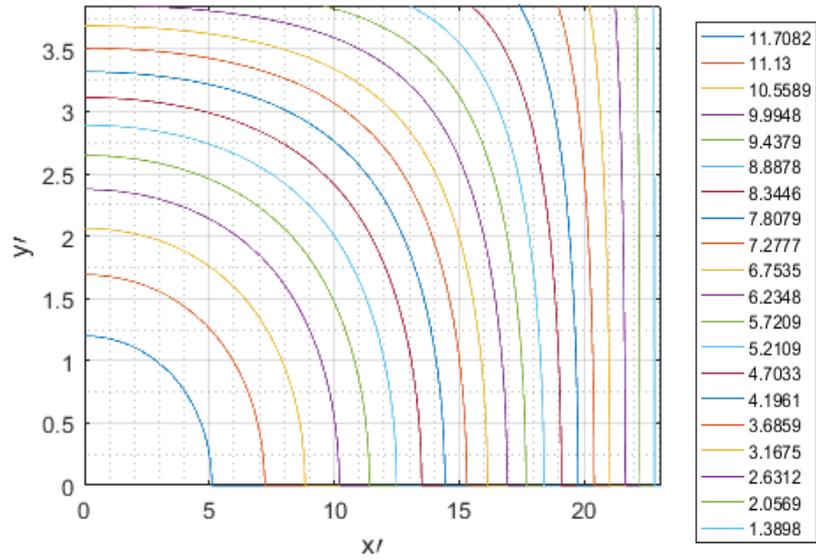


Рис. 3.3. Дискретизированное распределение ε'_{xx}

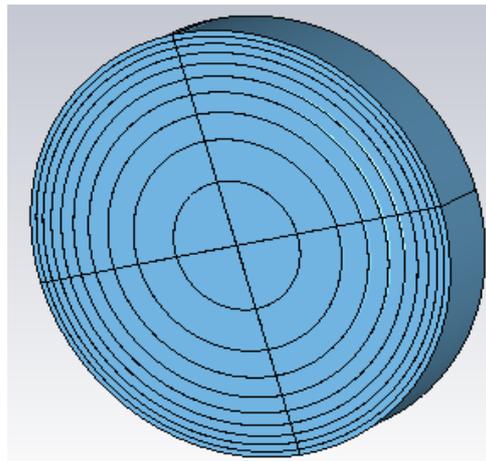


Рис. 3.4. Исследуемая плоская линза

Для определения фокусного расстояния, рассмотрим распределение электрического поля линзы в плоскости $x'o'y'$ при нормальном падении плоской электромагнитной волны на поверхность линзы (рисунок 3.5).

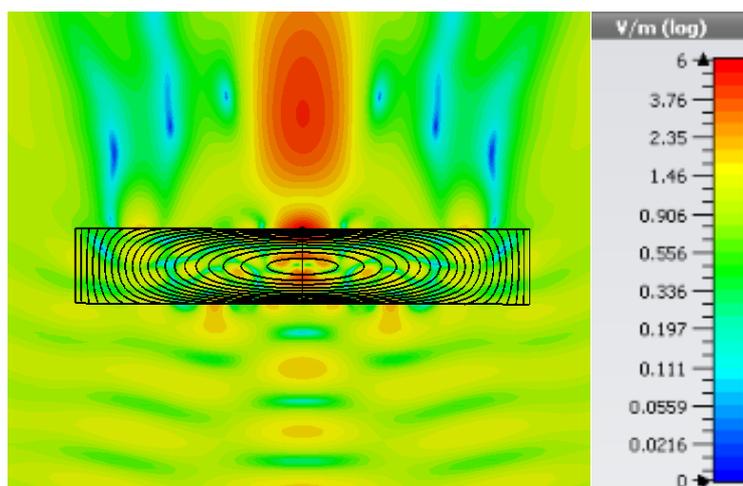


Рис. 3.5 Распределение электрического поля при нормальном падении плоской электромагнитной волны

Анализ полученных результатов показал, что фокус удален от центра линзы на 16 мм. Полученное значение фокусного расстояния используется при исследовании направленных свойств линзы.

В качестве облучателя линзы используется вибратор с рефлектором и директором. Для реализации пространственного сканирования антенной системы, облучатель сдвигается вдоль прямой (далее сдвиг облучателя), параллельной раскрыву линзы и проходящей через точку фокуса (по аналогии с [92]).

На рисунке 3.6 и рисунке 3.7 приведены частотные зависимости при разном повороте облучателя: КНД; КИП; ширины ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. Теоретические частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48], показаны на рисунке 3.6(а) и рисунке 3.7(а). На рисунке 3.8 показана входная характеристика – КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению).

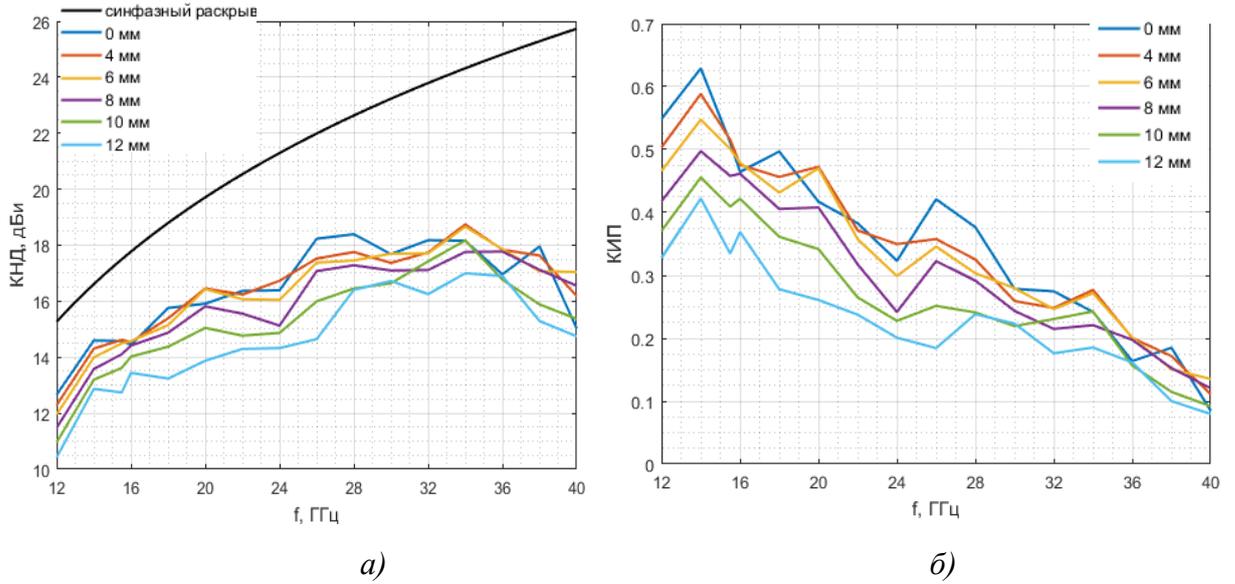


Рис. 3.6. Графики частотной зависимости КНД (а) и КИП(б) при разном сдвиге облучателя

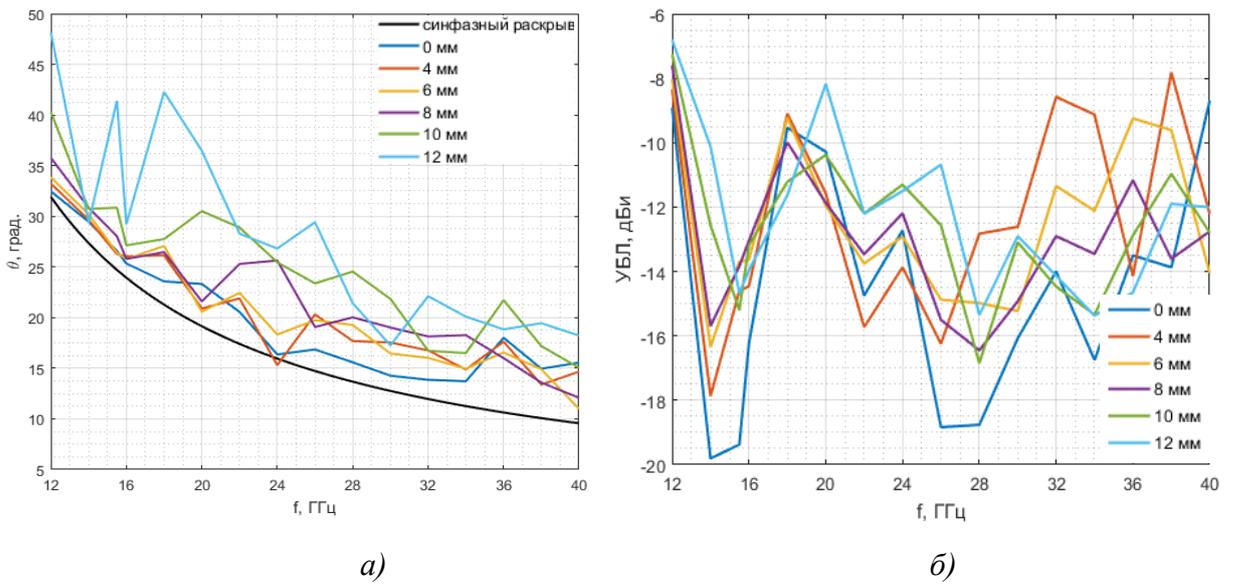


Рис. 3.7. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ (а) и УБЛ (б) при разном сдвиге облучателя

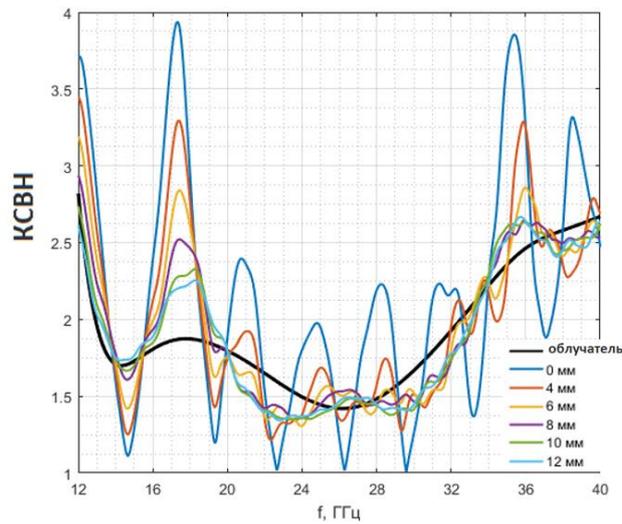


Рис. 3.8. КСВН при разном сдвиге облучателя

Анализ полученных результатов показал:

- в диапазоне 12-16 ГГц КИП больше 0,5, а КНД отличается от теоретического на 1-2,5 дБ;
- в диапазоне 12-16 ГГц при нулевом сдвиге КИП превышает 0,5.
- на частотах свыше 16 ГГц КИП убывает с ростом частоты, и его величина не превосходит 0,5 (максимальное значение КИП – 1);
- на частотах свыше 25 ГГц КИП не превосходит 0,42, при этом в области верхних частот КИП снижается до 0,2;
- ширина ДН при нулевом сдвиге больше теоретической на 5^0 - 10^0 ;
- при нулевом сдвиге облучателя наблюдаются периодические выбросы в частотной зависимости КСВН (рисунок 3.8).

На рисунке 3.9 показаны ДН в азимутальной плоскости при разном сдвиге облучателя на частоте 28 ГГц. Объемные ДН на частоте 28 ГГц показаны на рисунке 3.10.

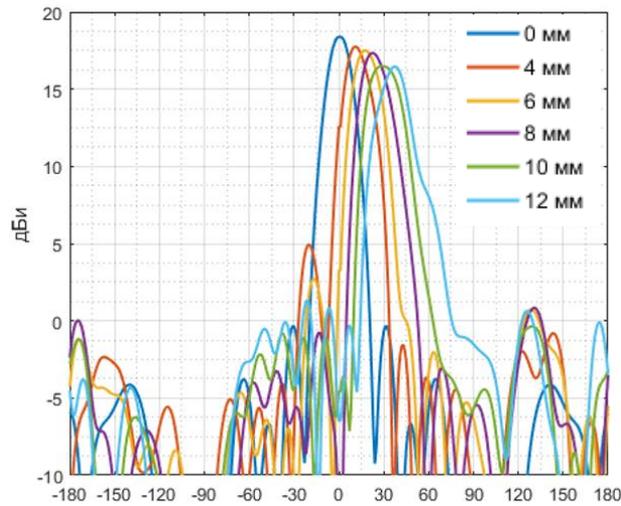
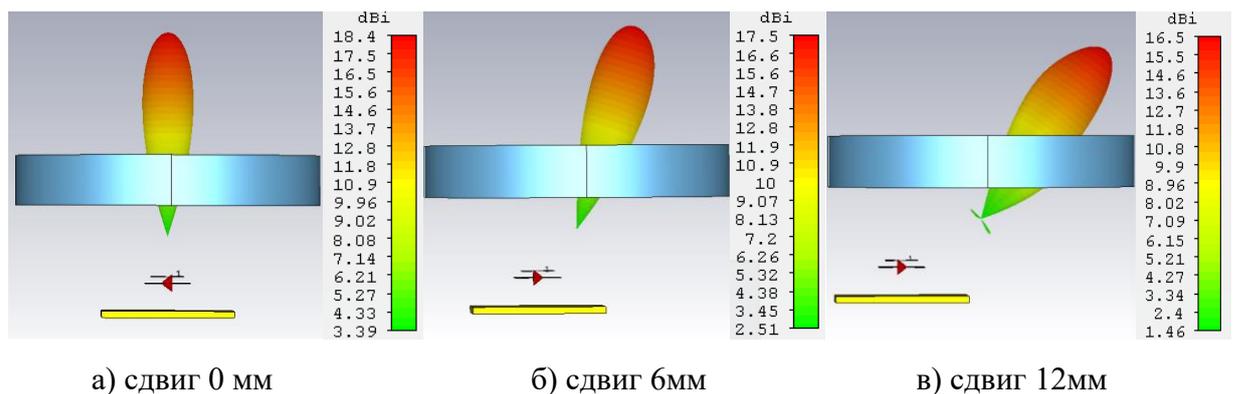


Рис. 3.9. ДН в азимутальной плоскости на частоте 28 ГГц при разном сдвиге облучателя



а) сдвиг 0 мм

б) сдвиг 6мм

в) сдвиг 12мм

Рис. 3.10. Объемные ДН на частоте 28 ГГц

Анализ полученные результаты показал, что при сдвиге облучателя:

- ухудшаются направленные свойства антенной системы из-за уменьшений значений КНД и КИП, а также увеличения ширины ДН;
- улучшается согласование антенной системы благодаря снижению периодических выбросов в частотной зависимости КСВН;
- при величине сдвига более 6 мм КСВН антенной системы близок к КСВН одиночного облучателя на частотах свыше 20 ГГц;

– при величине сдвига более 10 мм, КНД снижается на 2-3 дБ относительно исходного положения, а ширина главного лепестка ДН возрастает примерно в 2 раза, относительно теоретической.

Исходя из вышесказанного, с ростом частоты снижается эффективность антенной системы. Целесообразно сдвигать облучатель не более чем на 8-9 мм. При этом сектор сканирования уменьшается до 40° - 45° . Такая величина сектора обзора совпадает с результатами, полученными в [90, 92].

Таким образом, в данном разделе исследованы направленные и частотные характеристики трансформированной линзы Люнеберга (линза с плоским профилем) в широкой полосе без привязки к конкретной технической реализации.

Использование линзы с плоским профилем позволило существенно уменьшить продольные размеры антенной системы. При использовании сферической линзы Люнеберга минимальные продольные размеры МЛА равнялись бы диаметру линзы (46,2 мм), а при трехмерно-трансформированной – габариты не превышали бы 20 мм с учетом облучателей.

Основные недостатки исследуемой плоской линзы связаны с низкой эффективностью (КИП антенной системы в области верхних частот меньше 0,4) и ограниченным сектором сканирования. Классическая же сферическая линза Люнеберга позволяет в широкой полосе осуществлять широкоугольное сканирование без изменения формы ДН в каждом из лучей и снижения эффективности.

Однако, использование такой линзы позволяет создавать узкополосные МЛА с приемлемой эффективностью (КИП больше 0,5).

3.2. Исследование сферической линзы Люнеберга, состоящей из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра

В настоящее время технология трехмерной печати широко используется для создания различных устройств, обладающих крайней сложной

конструкцией для изготовления традиционными способами. В [69-73] описаны сферические линзы Люнеберга, изготовленных с использованием различных технологий трехмерной печати. По сути, в этих линзах используется искусственная среда на основе диэлектрика с частичным воздушным заполнением. Стоит отметить, что для технической реализации такой искусственной среды не всегда обязательно использовать технологии трехмерной печати, а можно использовать значительно более простой способ – перфорированные диэлектрические диски, изготовленные, например, с использованием ЧПУ-станка.

В настоящем разделе разработана сферическая линза Люнеберга для нужд спутниковой связи, состоящей из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра, а также исследованы направленные свойства при двух ортогональных поляризациях (линейная горизонтальная и вертикальная) [147]. Для численного электромагнитного моделирования используется метод Вейланда [129-131].

3.2.1. Разработка конструкции сферической линзы Люнеберга

Техническая реализация сферической линзы Люнеберга из набора перфорированных дисков осложняется тем, что значения $\varepsilon_{эфф}$ такой искусственной среды зависят от поляризации электромагнитной волны. Для уменьшения анизотропии предлагается «усреднить» значения для $\varepsilon_{эфф}$ горизонтальной и вертикальной поляризации. Рассмотрим подробнее.

Отверстия в дисках (толщиной 5 мм) располагаются в узлах треугольной сетки со стороной 2,5 мм. При этом центры отверстий, расположенных в соседних дисках, не совпадают друг с другом, а расположены так, чтобы центры отверстий в одном диске упирались в диэлектрик соседнего диска. В качестве диэлектрика используется полистирол ($\varepsilon_r = 2,5$ и $tg(\delta) = 0,001$).

Обозначим горизонтальной поляризацией – поляризацию с вектором напряженности электрического поля (\vec{E}), параллельным оси отверстий.

Горизонтальной поляризацией – поляризацию с вектором \vec{E} , перпендикулярным оси отверстий. Для вычисления значений $\varepsilon_{эфф}$ используются энергетические соотношения для энергии электрического поля, заключенного в одной ячейке, а также граничные условия на границе раздела двух диэлектриков. При этом магнитное взаимодействие с веществом не учитывается (из-за диэлектрического профиля линзы).

Энергия электрического поля (W_3) для одной ячейки (отверстия) при горизонтальной поляризации:

$$W_3 = \frac{S_\Sigma t \varepsilon_0 \varepsilon_{эфф_h} \vec{E}^2}{2} \quad (3.3)$$

где: $\varepsilon_{эфф_h}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость при горизонтальной поляризации; t – толщина диэлектрика (5 мм); S_Σ – площадь ячейки; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

С учетом непрерывности вектора \vec{E} на границе раздела двух диэлектриков, W_3 вычисляется следующим образом:

$$W_3 = \frac{S_\Sigma t \varepsilon_0 \vec{E}^2 (S_1 \varepsilon_1 + S_2 \varepsilon_2)}{2}, \quad (3.4)$$

$$S_2 = 1 - S_1 \quad (3.5)$$

где: S_1 – отношение площади отверстия (воздуха) к S_Σ ; отношение площади диэлектрика (полистирола) к S_Σ ; ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха (1); ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость полистирола.

Приравнивая (3.3) и (3.4) и учитывая (3.5), получаем выражение для расчета $\varepsilon_{эфф_h}$:

$$\varepsilon_{эфф_h} = S_1(1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_2 \quad (3.6)$$

Полученное соотношение (3.6) совпадает с формулой из [66].

При вертикальной поляризации для расчета W_3 используем вектор индукции электрического поля (\vec{D}):

$$W_3 = \frac{S_{\Sigma} t \vec{D}^2}{2 \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{эфф}_{-v}}} \quad (3.7)$$

где: $\varepsilon_{\text{эфф}_{-v}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость при вертикальной поляризации.

Учитывая, что при вертикальной поляризации вектор \vec{D} непрерывен на границе раздела двух сред, W_3 вычисляется следующим образом:

$$W_3 = \frac{S_{\Sigma} t \vec{D}^2}{2 \varepsilon_0} \left(\frac{S_1}{\varepsilon_1} + \frac{S_2}{\varepsilon_2} \right) \quad (3.8)$$

Приравнивания (3.7) и (3.8) получаем выражение для расчета $\varepsilon_{\text{эфф}_{-v}}$:

$$\varepsilon_{\text{эфф}_{-v}} = \frac{\varepsilon_2}{S_1(\varepsilon_2 + 1) + 1} \quad (3.9)$$

Полученное соотношение (3.9) отличается от (3.6). Для расчета $\varepsilon_{\text{эфф}}$ возьмем среднее $\varepsilon_{\text{эфф}_{-h}}$ и $\varepsilon_{\text{эфф}_{-v}}$ (усредненная $\varepsilon_{\text{эфф}}$):

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{S_1(1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_2 + \frac{\varepsilon_2}{S_1(\varepsilon_2 + 1) + 1}}{2} \quad (3.10)$$

На рисунке 3.11 показаны графики зависимости $\varepsilon_{\text{эфф}}$ от диаметра воздушного отверстия (d), построенные с использованием (3.6), (3.9) и (3.10).

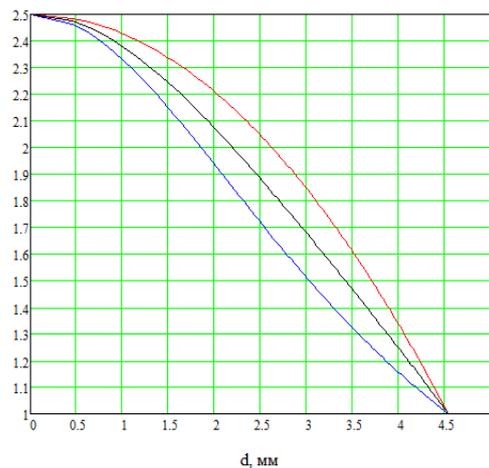


Рис. 3.11. Графики зависимости эффективной диэлектрической проницаемости от диаметра отверстия: горизонтальная поляризация (красная линия), вертикальная поляризация (синяя линия), усредненная (черная линия)

Для технической реализации сферической линзы Люнеберга из перфорированных диэлектрических дисков можно использовать технологии трехмерной печати или ЧПУ-станок. При этом необходимо учитывать некоторые технологические особенности такой конструкции.

– При больших значениях d конструкция линзы на краю станет хрупкой из-за тонкого диэлектрика между двумя соседними отверстиями. Поэтому целесообразно сделать минимальную толщину диэлектрика в линзе не менее 1 мм.

– При малых значениях d тонкие сверла ЧПУ-станка могут ломаться в процессе изготовления диэлектрических дисков. В этом случае целесообразно использовать d не менее 1 мм.

Учитывая все технологические особенности, а также зависимость $\varepsilon_{эфф}$ от d (рисунок 3.11), при разработке линзы используется соотношения (1.4)-(1.8), учитывающие наличие внешнего слоя. Геометрические параметры сферической линзы:

- диаметр линзы 200 мм, т.е. 40 перфорированных круглых дисков;
- фокус расположен на поверхности линзы;
- $\varepsilon_{эфф}$ в центре линзы 2,331, (d равен 1,2 мм);
- $\varepsilon_{эфф}$ внешнего слоя 1,68 (d равен 3 мм);
- радиус внешнего слоя 77,1 мм.

Внешний вид разработанной сферической линзы Люнеберга показан на рисунке 3.12.



Рис. 3.12. Сферическая линза Люнеберга из диэлектрических перфорированных дисков

Таким образом, в данном подразделе разработана методика для расчета значений $\varepsilon_{эфф}$ периодической структуры в виде отверстий в диэлектрике. Суть разработанной методики заключается в следующем:

- центры воздушных отверстий, расположенных в соседних диэлектрических дисках, упираются в диэлектрик соседнего диска, это позволяет окружить отверстие диэлектриком со всех сторон;

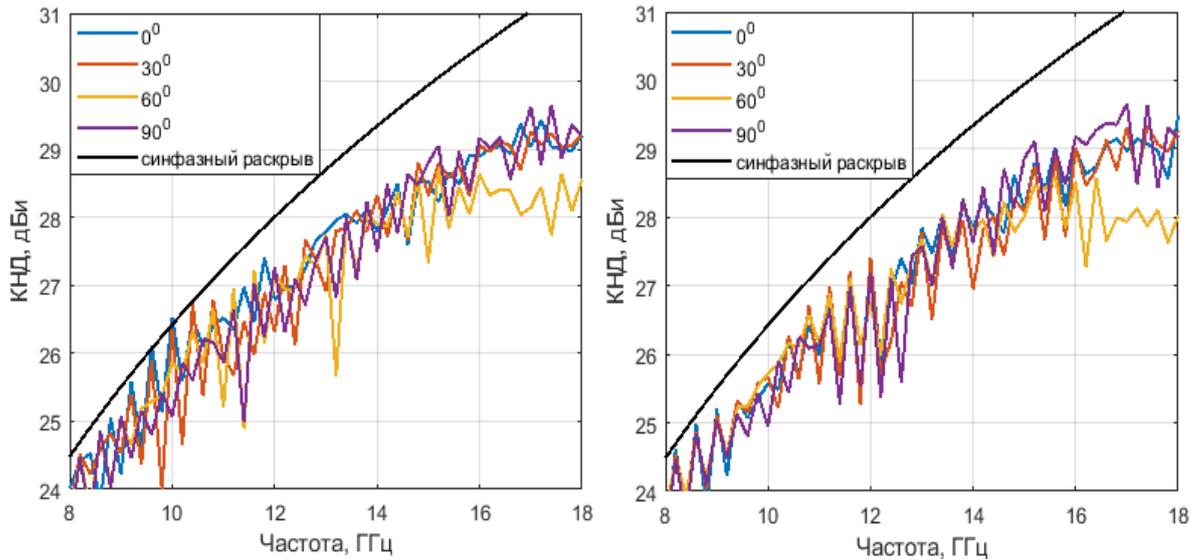
- значения $\varepsilon_{эфф}$ рассчитываются для вертикальной и горизонтальной поляризации отдельно с использованием энергетических соотношений для энергии электрического поля, заключенного в одной ячейке, а также граничных условий на границе раздела двух диэлектриков;

- для расчета итогового значения $\varepsilon_{эфф}$ используется среднее арифметическое проницаемостей для горизонтальной и вертикальной поляризации.

С использованием разработанной методики, рассчитаны значения $\varepsilon_{эфф}$, а на их основе разработана сферическая линза Люнеберга.

3.2.2. Исследование направленных и частотных характеристик сферической линзы Люнеберга

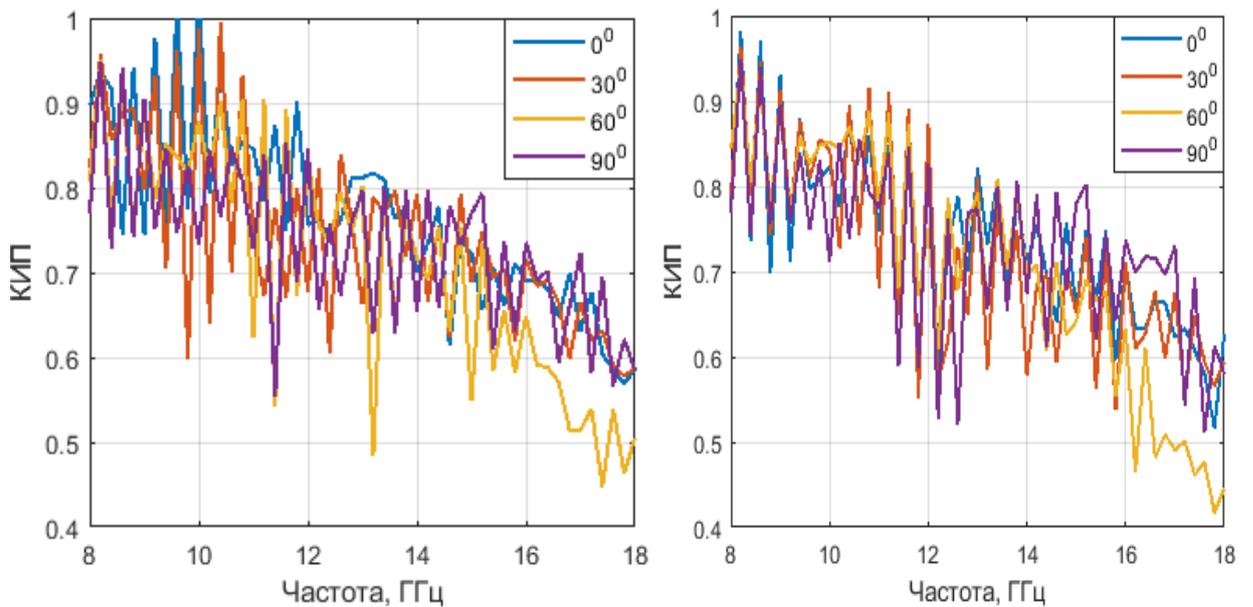
Для анализа влияния анизотропии рассматриваются направленные характеристики при разных углах поворота облучателя относительно центра линзы (далее поворот облучателя). Перпендикулярное дискам положение облучателя считается нулевым (исходным). В качестве облучателя используется вибратор с рефлектором. На рисунках 3.13-3.16 приведены частотные зависимости при повороте облучателя: КНД; КИП; УБЛ; ширины ДН по уровню -3 дБ. На рисунках 3.13 и 3.16 показаны теоретические частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрытия, вычисленные согласно [48].



а) горизонтальная поляризация

б) вертикальная поляризация

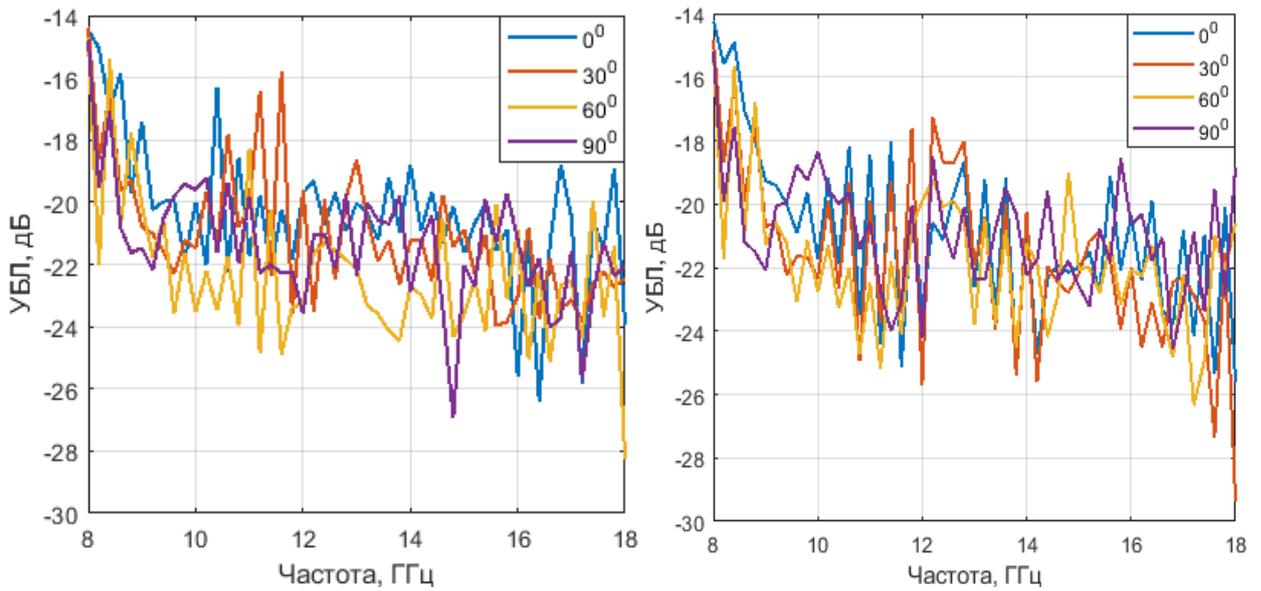
Рис. 3.13. Графики частотной зависимости КНД при повороте облучателя



а) горизонтальная поляризация

б) вертикальная поляризация

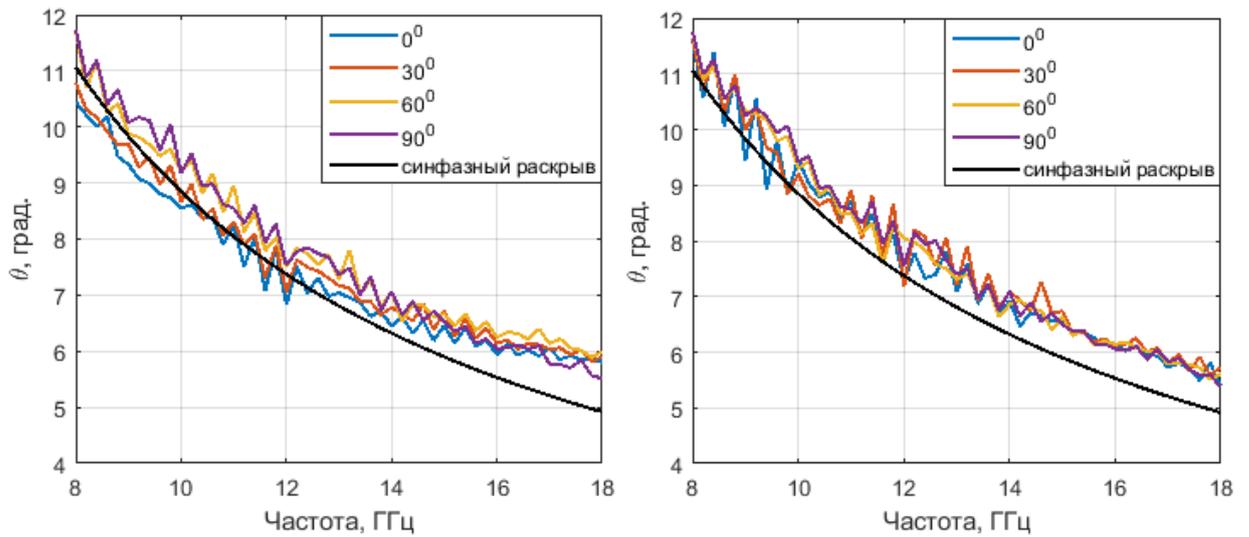
Рис. 3.14. Графики частотной зависимости КИП при повороте облучателя



а) горизонтальная поляризация

б) вертикальная поляризация

Рис. 3.15. Графики частотной зависимости УБЛ при повороте облучателя



а) горизонтальная поляризация

б) вертикальная поляризация

Рис. 3.16. Графики частотной зависимости ширины ДН по уровню -3 дБ при повороте облучателя

На рисунке 3.17 показаны ДН в Е-плоскости на частоте 12 ГГц.

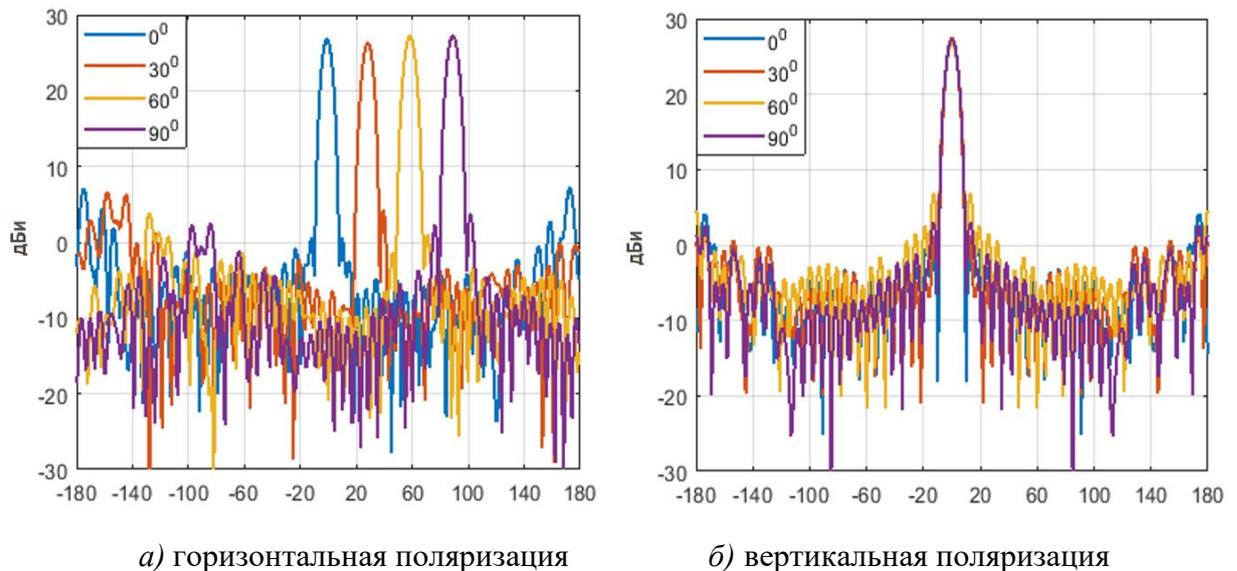


Рис. 3.17. ДН в Е-плоскости на частоте 12 ГГц

Анализ полученных результатов показал:

1. на частотах ниже 16 ГГц КНД в обоих случаях (горизонтальная и вертикальная поляризация) отличается от теоретического в пределах 2 дБ, при этом на некоторых частотах наблюдаются локальные минимумы, на частотах выше 16 ГГц КНД отличается от теоретического не более чем на 3,5 дБ;
2. КИП снижается с ростом частоты в обоих случаях, при этом на частотах ниже 16 ГГц его величина превышает 0,6, однако на некоторых частотах наблюдаются локальные минимумы, на частотах выше 16 ГГц величина КИП превосходит 0,4;
3. КНД при горизонтальной поляризации выше, чем при вертикальной не более чем на 1,5 дБ; КИП при горизонтальной поляризации выше на 0,1-0,2, чем при вертикальной поляризации;
4. УБЛ в обоих случаях имеет схожие значения (отличие в пределах 1-2 дБ, при этом на некоторых частотах наблюдаются локальные минимумы и максимумы, при этом в диапазоне 10-14,5 ГГц УБЛ при горизонтальной поляризации не превосходит -16 дБ, а при вертикальной поляризации – не превосходит -18 дБ;
5. возрастание УБЛ на некоторых частотах связано ростом отраженной от линзы энергии – увеличение уровня обратного излучения из-за

относительно высоких значений $\varepsilon_{эфф}$ (по сравнению со значениями в классической линзе Люнеберга), и неоптимальной формой облучателя;

6. в обоих случаях ширина ДН отличается от теоретической не более чем на $1,5^\circ$;

7. при повороте облучателя на 60° , снижаются КНД и КИП, однако не расширяется главный лепесток ДН и не возрастает УБЛ. При остальных значениях угла поворота облучателя направленные характеристики изменяются не значительно.

На рисунке 3.18 показаны объемные ДН.

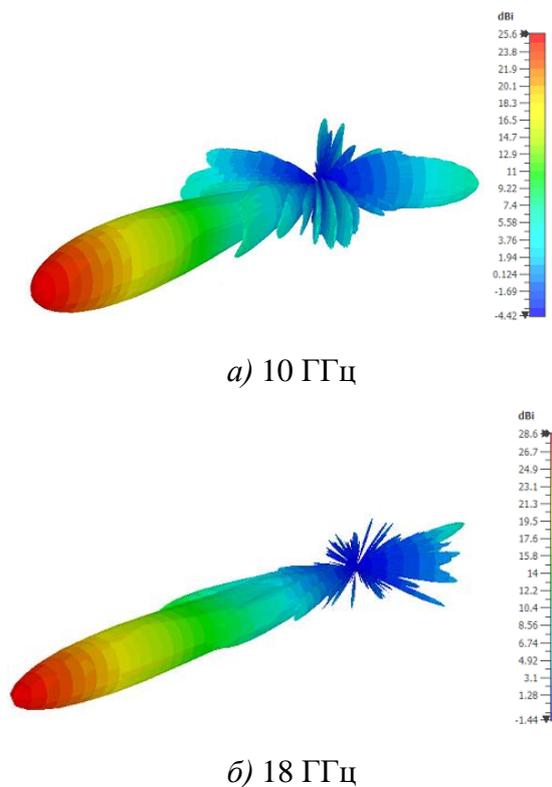


Рис. 3.18. Объемные ДН сферической линзы Люнеберга

Таким образом, в настоящем разделе разработана и исследована сферическая линза Люнеберга, состоящая из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра. Несмотря на наличие анизотропии у периодической структуры, разработанная линза имеет схожие направленные свойства при двух ортогональных поляризациях, что подтверждает достоверность разработанной методики для расчета $\varepsilon_{эфф}$.

3.3. Сравнительный анализ конструкций сферических линз Люнеберга

В разделе 3.2 разработана сферичная линза Люнеберга, техническая реализация которой возможна как с использованием современных технологий трехмерной печати, так и с использованием ЧПУ-станка. Однако в разработанной линзе значения $\varepsilon_{эфф}$ выше, чем в классической линзе Люнеберга, закон изменения которой рассчитывается согласно (1.3). Также у периодической структуры линзы присутствует анизотропия, которая, однако, не помешала функционированию линзы при двух ортогональных поляризациях. Актуальным вопросом является сравнение характеристик разработанной сферической линзы с характеристиками классической сферической линзы Люнеберга, периодическая структура которой представляет собой диэлектрик с частичным воздушным заполнением. Примером такой линзы может быть сферическая линза из [70].

В данном разделе проведен сравнительный анализ характеристик двух конструкций сферической линзы Люнеберга: из набора перфорированных диэлектрических дисков, из диэлектрических кубиков разного размера [148].

Рассмотрим сферическую линзу диаметров 200 мм, состоящую из диэлектрических кубиков, соединенных тонкими диэлектрическими стержнями для придания механической жесткости, аналогично [70]. В качестве диэлектрика используется полистирол. Анизотропия ячейки такой периодической структуры пренебрежимо мала (считаем, что отсутствует) из-за симметричной конструкции. Геометрические параметры периодической структуры: размер одной ячейки 5x5x5 мм, толщина соединительных диэлектрических стержней 0,8 мм, размер стороны диэлектрического кубика (b) – переменная величина, влияющая на значения $\varepsilon_{эфф}$ [70]. На рисунке 3.19(а) показан внешний вид ячейки периодической структуры. Для расчета значений $\varepsilon_{эфф}$ используются соотношения (2.1)-(2.5). Зависимость $\varepsilon_{эфф}$ от b показана на рисунке 3.19(б).

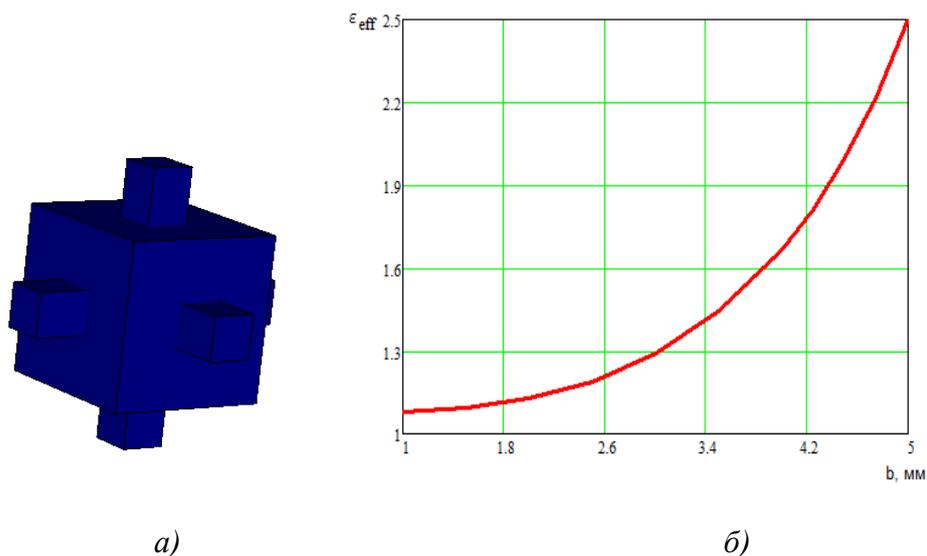


Рис. 3.19. Внешний вид периодической структуры (а), зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от размера кубика

На рисунке 3.20 показан внешний вид сферической линзы Люнеберга, состоящей из диэлектрических кубиков. Для изготовления такой линзы используются современные технологии трехмерной печати.



Рис. 3.20. Сферическая линза Люнеберга, состоящая из диэлектрических кубиков

В таблице 1 приведены характеристики исследуемых сферических линзы Люнеберга.

Таблица 1. Характеристики исследуемых линз Люнеберга

	Линза Люнеберга из диэлектрических кубиков	Линза Люнеберга из перфорированных дисков
Диаметр, мм	200	200
Фокусное расстояние, мм	100	100
Расчетная масса, кг	1,439	3,065
Технологии изготовления	Трехмерная печать	Трехмерная печать, ЧПУ- станок
$\epsilon_{эфф}$ в центре линзы	2	2,331
Радиус внешней оболочки, мм	–	77,1 мм
$\epsilon_{эфф}$ оболочки	–	1,68

Анализ характеристик, приведенных таблице 1, показывает:

– линза из перфорированных дисков тяжелее, чем линза из диэлектрических дисков (ее масса больше на 1,626 кг);

– для изготовления обеих линз используются технологии трехмерной печати, однако изготовление линзы из перфорированных дисков возможно с использованием ЧПУ-станка;

– линза из перфорированных дисков имеет более высокие значения $\epsilon_{эфф}$ как на краю, так и в центре линзы, поэтому могут потребоваться дополнительные меры для улучшения согласования антенной системы;

– линза из перфорированных дисков имеет более прочную механическую конструкцию из-за отсутствия большого числа мелких элементов, однако для линзы из диэлектрических кубиков необходимо использовать дополнительные оболочки для защиты от механических повреждений из-за наличия большого числа мелких элементов.

На рисунке 3.21 и рисунке 3.22 представлены частотные зависимости: КНД; КИП; ширины главного лепестка ДН по уровню -3 дБ; УБЛ. Также на рисунке 3.21(а) и рисунке 3.22(б) показаны теоретические частотные зависимости КНД и ширины ДН по уровню -3 дБ для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [48]. На рисунке 3.23 показаны ДН исследуемых линз в Е-плоскости, а на рисунке 3.24 показаны ДН в объеме на частоте 14 ГГц.

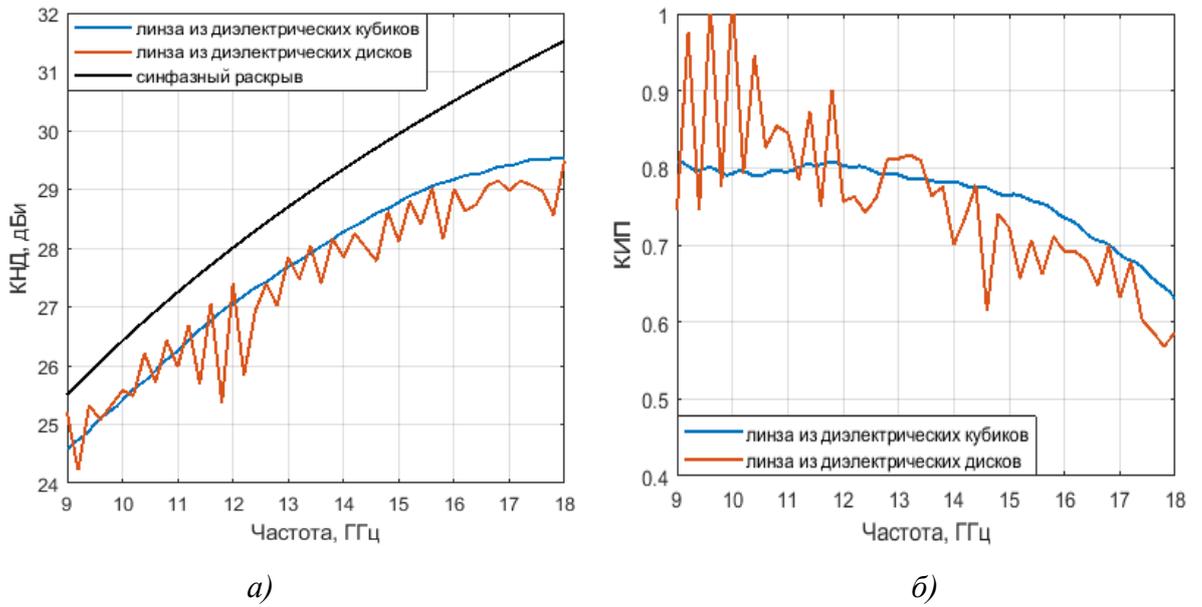


Рис. 3.21. Частотные зависимости КНД (а) и КИП (б)

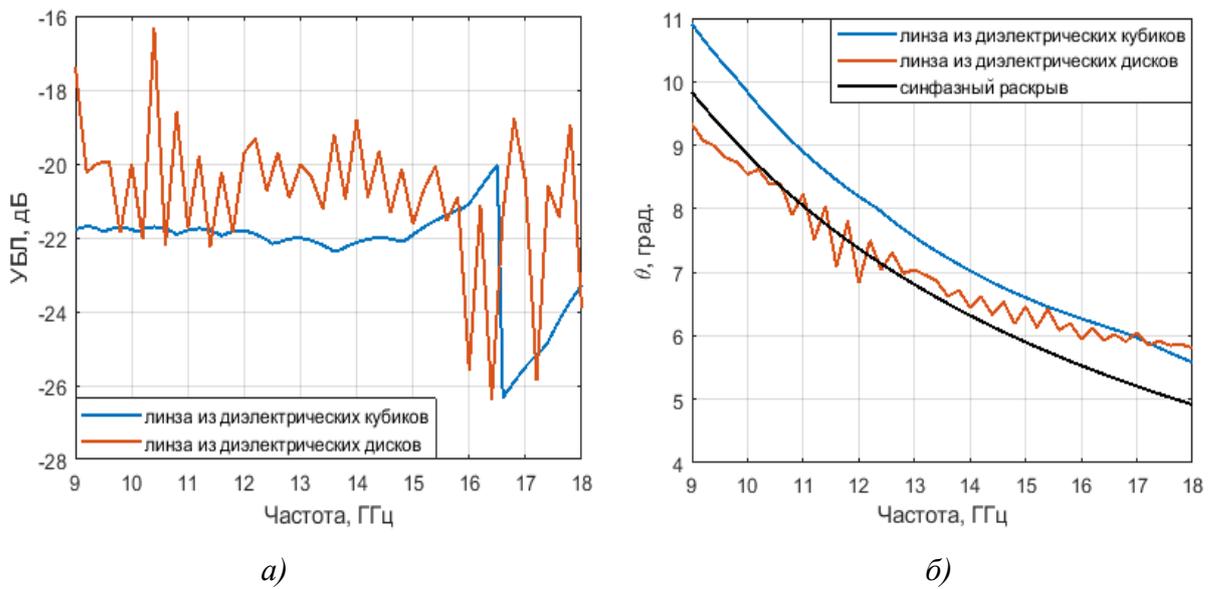


Рис. 3.22. Частотные зависимости УБЛ (а) и ширины ДН (б)

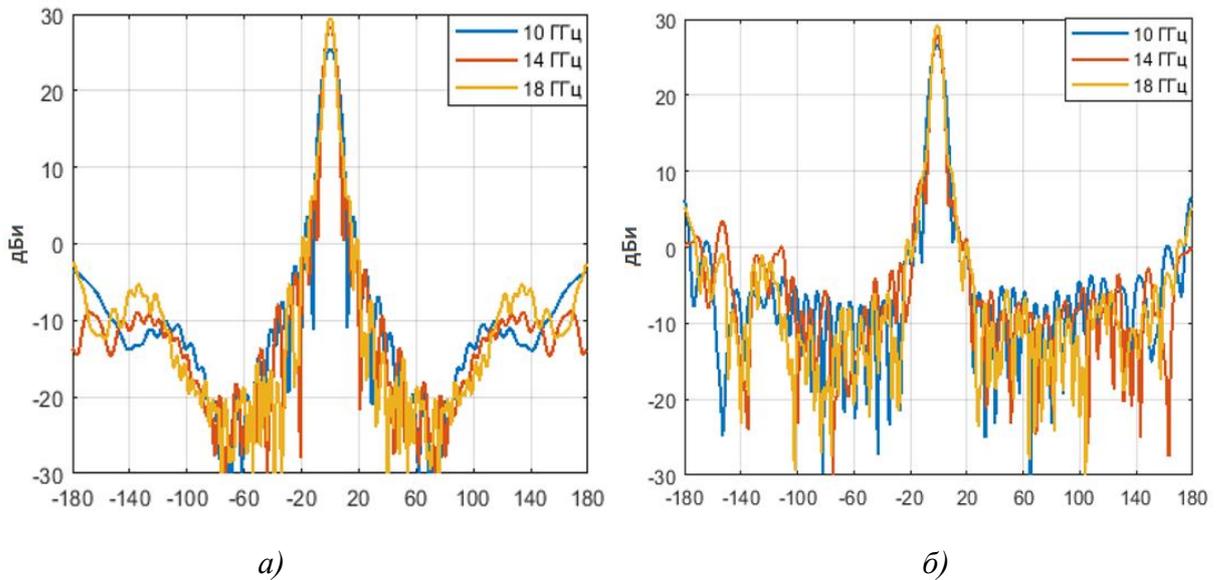


Рис. 3.23. ДН линзы из диэлектрических кубиков (а) и перфорированных дисков (б) в Е-плоскости

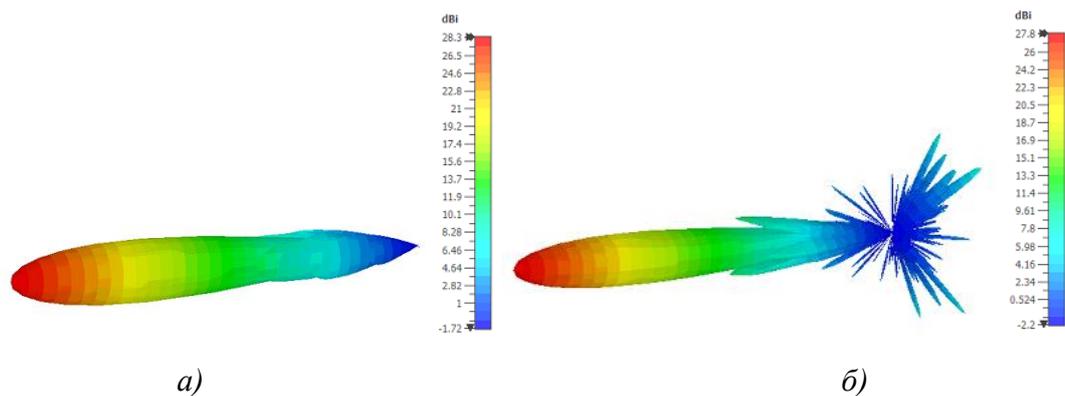


Рис. 3.24. Объемные ДН на 14 ГГц линзы из диэлектрических кубиков (а) и перфорированных дисков (б)

Анализ полученных результатов показал:

- линза из диэлектрических кубиков имеет непрерывные частотные зависимости КНД, КИП и ширины ДН, у линзы из диэлектрических дисков имеются локальные максимумы и минимумы;
- обе линзы имеет схожие значения КНД (отличие не более 1,5 дБ) и
- на частотах ниже 16 ГГц КНД в обои случаях отличается от теоретического в пределах 1,5 дБ, на частотах свыше 16 ГГц – отличается не более чем на 3 дБ;

– УБЛ линзы из диэлектрических кубиков ниже -20 дБ во всем исследуемом диапазоне частот, у линзы из диэлектрических дисков УБЛ ниже -18 дБ, однако на некоторых частотах имеется локальные максимумы, в которых УБЛ достигает -16,3 дБ;

– из-за более высоких значений $\varepsilon_{эфф}$ у линзы из диэлектрических дисков возрастает доля отраженной от поверхности линзы энергии, поэтому у нее выше уровень обратного излучения;

– ширина ДН линзы из диэлектрических дисков на частотах ниже 16 ГГц незначительно отличается от теоретической (отличие менее 1^0), на частотах выше 16 ГГц – больше теоретической на 1^0 , тогда как у линзы из диэлектрических кубиков ширина ДН больше теоретической на $1^0-1,5^0$ во всем исследуемом диапазоне частот.

Таким образом, в данном разделе проведен сравнительный анализ характеристик двух конструкций сферической линзы Люнеберга: из диэлектрических кубиков переменного размера, диэлектрических перфорированных дисков. Для технической реализации обеих линз используются современные технологии трехмерной печати. Изготовление линзы из перфорированных дисков возможно с использованием ЧПУ-станка. Линза из диэлектрических кубиков обладает меньшей массой и механической прочностью.

Обе линзы имеют схожие направленные свойства, однако у линзы из перфорированных дисков выше УБЛ и уровень обратного излучения.

3.4. Выводы по третьей главе

Подводя итоги исследований, проведенных в третьей главе диссертации, перечислим полученные результаты.

1. Исследованы направленные и частотные характеристики трехмерно-трансформированной линзы Люнеберга с плоским профилем в широкой полосе без привязки к конкретной технической реализации. Плоский профиль позволяет практически в 2 раза уменьшить продольные размеры

МЛА. Широкополосные антенные системы, созданные на основе такой линзы, обладают низкой эффективностью, а также ограниченным сектором сканирования. Однако линзу Люнеберга с плоским профилем возможно использовать для построения узкополосных МЛА с приемлемой эффективностью (КИП больше 0,5).

2. На основе соотношений для энергии электрического поля, заключенного в одной ячейке периодической структуры в виде отверстий в диэлектрике, а также с использованием условий непрерывности на границе раздела двух диэлектриков, разработана методика расчета $\varepsilon_{эфф}$, позволяющая минимизировать анизотропию за счет ее усреднения.

3. Разработана и исследована сферическая линза Люнеберга, состоящая из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра. Несмотря на наличие анизотропии у периодической структуры, антенная система, на основе данной линзы, имеет схожие направленные свойства при двух ортогональных поляризациях. Это подтверждает достоверность разработанной методики для расчета $\varepsilon_{эфф}$.

4. Проведен сравнительный анализ характеристик двух конструкций сферической линзы Люнеберга: из диэлектрических кубиков переменного размера, диэлектрических перфорированных дисков. Технической реализация обеих линз возможна с использованием современных технологии трехмерной печати. Однако изготовление линзы из перфорированных дисков возможно с использованием ЧПУ-станка. Линза из диэлектрических дисков обладает большей массой и механической прочностью конструкции. Установлено, что обе линзы имеют схожие направленные свойства, однако линза из диэлектрических кубиков имеет непрерывные частотные характеристики, а меньший УБЛ и уровень обратного излучения.

4. Исследование и разработка многолучевой антенной системы на основе нерегулярной линзы

Улучшение направленных свойств (повышение КНД, уменьшение ширины главного лепестка ДН) апертурных антенн (к которым относятся и линзовые антенны) достигается несколькими способами:

– увеличением апертуры излучающей поверхности. Однако, при этом увеличиваются габариты, масса, сложность изготовления и стоимость антенны. Эти факторы, в ряде случаев, препятствуют или делают невозможным использование крупно апертурных антенн, например, в мобильных терминалах спутниковой связи, размещаемых на борту подвижных средств.

– использование АР, состоящих из электрически больших излучателей. Однако, в этом случае существует целый ряд проблем, которые ухудшают направленные свойства и уменьшают сектор сканирования МЛА. В частности, такие АР характеризуются достаточно высокими значениями УБЛ, что в режиме приема способствует повышению шумовой температуры антенной системы. Это ограничивает сферу применения в системах связи с очень слабыми сигналами, например, в мобильных терминалах спутниковой связи.

В настоящей главе разработана методика, позволяющая уменьшить УБЛ в АР, состоящей из электрически больших линзовых антенн. На основе разработанной методики, синтезированы и исследованы различные варианты антенных систем для мобильных терминалов спутниковой связи, имеющих УБЛ, близкий к величине $-13,2$ дБ – УБЛ непрерывного равноамплитудного раскрыва. Разработаны новые конструкции антенн для мобильных терминалов спутниковой связи на основе нерегулярной линзы, позволяющие создавать как МЛА, так и синфазные АР, обладающих высокими направленными свойствами. Изготовлен действующий макет АР для мобильного терминала спутниковой связи, а также проведены измерения основных электродинамических характеристик антенн.

По результатам исследований получен патент на изобретение №2765570 «Нерегулярная линза и многолучевая антенная система с двумя ортогональными поляризациями на ее основе» (приложение А).

4.1. Проблемы построения линейных антенных решеток из электрически больших линзовых элементов

Для формирования узкой ДН в одной плоскости используют линейные АР: идентичные, одинаково ориентированные антенные элементы излучателей расположены вдоль прямой линии. ДН линейной АР ($f(\theta)$), в общем случае, вычисляется по теореме умножения ДН [143]:

$$f(\theta) = F_1(\theta)F_{\text{реи}}(\theta) \quad (4.1)$$

где: $F_1(\theta)$ – ДН одиночного излучателя; $F_{\text{реи}}(\theta)$ – множитель АР, не зависящий от типа излучателя, а определяемый геометрией расположения облучателей, и значениями комплексных амплитуд токов по их входам.

Если излучатели одинаково ориентированы и находятся на одинаковом расстоянии d друг от друга, а фазовый сдвиг тока в любых соседних излучателях составляет α , то ДН такой АР (линейная эквидистантная АР) определяется согласно [143]:

$$f(\theta) = F_1(\theta) \frac{\sin \left[\frac{N}{2} (kd \cos \theta - \alpha) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta - \alpha) \right]} e^{j(N-1)(kd \cos \theta - \alpha)/2} \quad (4.2)$$

где: θ – угол, отсчитываемый от линии расположения излучателей; N – число элементов АР.

В (4.2) последний множитель определяет фазовую характеристику АР. Основным интерес представляет амплитудная характеристика, то его можно опустить. Отметим, что в синфазной АР фазовый центр расположен в середине [143].

Поскольку форма ДН АР определяется множителем АР, рассмотрим второй множитель в (4.2). Нормированная характеристика направленности ($f_N(\theta)$):

$$f_N(\psi) = \left| \frac{\sin(\psi)}{N \sin(\psi / N)} \right|, \quad (4.3)$$

$$\psi = N(kd \cos \theta - \alpha) / 2 \quad (4.4)$$

Функция множителя линейной эквидистантной АР (4.3) является периодической функцией с периодом равным $N\pi$, а при значениях аргумента $\psi_M / N = M\pi$, $M = \pm 1, \pm 2, \dots$ имеет максимумы единичного уровня. Поэтому помимо основного лепестка ($\psi = 0$) имеются еще побочные главные лепестки (дифракционные максимумы). Если при фиксированной длине АР увеличивать число излучателей до бесконечности ($N \rightarrow \infty$ и $d \rightarrow \infty$), то функция множителя АР (4.3) станет эквивалентна $|\sin(\psi) / \psi|$, то есть форме ДН линейного непрерывного излучателя. При этом у линейного непрерывного излучателя УБЛ равен -13,2 дБ. [143]

Реальной ДН будет соответствовать не вся область определения функции (4.3), а только та, в которой $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (область видимости), что эквивалентно:

$$\psi_{\max} = \frac{N}{2}(kd - \alpha), \quad \psi_{\min} = -\frac{N}{2}(kd + \alpha) \quad (4.5)$$

При этом размер области видимости зависит только от длины АР. Направление максимума излучения (θ_0) определяется из соотношения [143]:

$$\cos \theta_0 = \alpha / kd \quad (4.6)$$

Попадание побочных дифракционных максимумов в область видимости приводит к существенному увеличению УБЛ. Поэтому для исключения их из области видимости, интервал изменения ψ ограничивают (рисунок 4.1) [143]:

$$-(N - 1)\pi \leq \psi \leq (N - 1)\pi \quad (4.7)$$

В этом интервале отсутствуют побочные дифракционные максимумы, а УБЛ не превышает величину первого бокового лепестка. Учитывая (4.5), шаг АР выбирается из соотношения [143]:

$$d \leq \frac{N-1}{N} \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_0|} \quad (4.8)$$

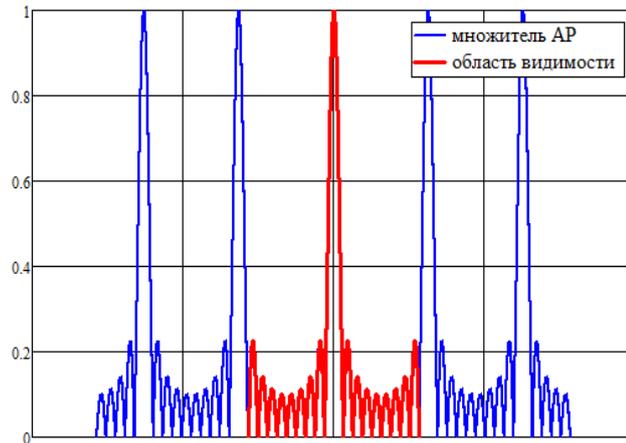


Рис. 4.1. Множитель линейной эквидистантной антенной решетки

Из (4.8) следует, что для синфазной АР ($\theta_0 = 90^\circ$) d должен быть менее длины волны. Очевидно, что при использовании в качестве излучателей АР линзовых антенн, диаметр которых превышает минимум три длины волны свободного пространства, добиться выполнения соотношения (4.8) физически невозможно.

Другой способ подавления дифракционных максимумов заключается в использовании высоконаправленных элементов. Суть этого метода напрямую вытекает из соотношений (4.1) и (4.2): если излучатель АР имеет высоконаправленную ДН, т.е. незначительное излучение в направлении побочных дифракционных максимумов, то эти максимумы окажутся подавленными [143]. Улучшение направленных свойств АР из линзовых элементов может быть достигнуто за счет увеличения числа слоев линзы (например, использование высоконаправленных линз Люнеберга). Однако, такое техническое решение значительно усложнит технологию производства

и увеличит стоимость антенной системы. К тому же, нет никаких гарантий, что УБЛ станет близким или ниже величины $-13,2$ дБ.

Использование неэквидистантных АР из линзовых элементов – мало эффективный способ подавления побочных дифракционных максимумов. В этом случае увеличатся габариты антенной системы, что ограничит ее применение в мобильных или спутниковых терминалах связи. При этом нет гарантий, что УБЛ приблизится к $-13,2$ дБ (или станет ниже).

Кроме повышения УБЛ, в линейных АР, состоящих из сферических линзовых антенн (из однородного диэлектрика или линз Люнеберга), ограничены углы приема (передачи сигналов) соседних облучателей из-за пересечения передаваемого (принимаемого) сигнала с участком соседней линзы. Для решения данной проблемы в патенте [46] предложены технические решения, позволяющие облучить две (или более) сферические линзы так, чтобы электромагнитная энергия, фокусируемая первой линзой, не пересекала поверхность соседней линзы (или большого числа линз, входящих в АР). Кроме того, выбором оптимального расположения облучателей можно добиться минимизации дифракционных максимумов АР, а также добиться минимальных провалов ДН [46]

Таким образом, в настоящее время существует актуальная проблема, связанная с необходимостью уменьшения УБЛ до величины $-13,2$ дБ в линейных синфазных АР, состоящих из линзовых элементов.

4.2. Исследование и разработка многолучевых антенных систем на основе нерегулярной линзы для мобильного терминала спутниковой связи

В настоящем разделе исследована и разработана линейная синфазная АР для мобильного терминала спутниковой связи из электрически больших линзовых элементов измененной формы (усеченные сферы). Благодаря такому техническому решению, распределение поле в раскрыве антенны становится близким к непрерывному, и, практически, компенсируются побочные

дифракционные максимумы. Для численного трехмерного электромагнитного моделирования используется метод Вейланда [129-131].

4.2.1. Методика снижения УБЛ в линейных синфазных АР, состоящих из электрически больших линзовых элементов

В настоящем подразделе разработана методика, позволяющая существенно снизить УБЛ в линейных синфазных АР с электрически большими линзовыми излучателями.

Нерегулярная линза – это линза, состоящая из пересекающихся друг с другом линзовых антенн (т.е. из объединенных усеченных линз), расположенных на одной оси. На рисунке 4.2 показан пример построения нерегулярной линзы на основе усеченных сфер [149].

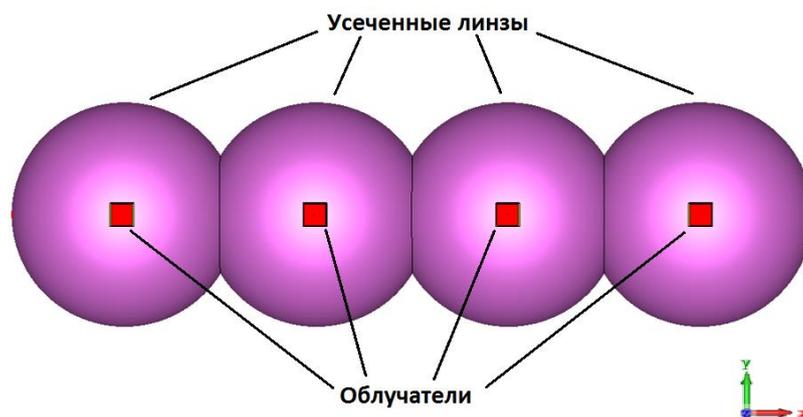


Рис. 4.2. Антенная система на основе нерегулярной линзы

Каждый из облучателей создает сферическую волну, большая часть энергии которой проходит через усеченную линзу, напротив которой он расположен, а оставшаяся доля энергии его излучения приходится на соседние усеченные линзы. Это позволяет реализовать распределение поля в раскрытии нерегулярной линзы близкое к синфазному и равноамплитудному, а также снизить УБЛ до величины -13,2 дБ, и получить КНД, близкий к предельно достижимому при заданных размерах линзы [149].

Нерегулярная линза может быть выполнена на основе различных типов линзовых антенн. Например, на основе сферических (из однородного диэлектрика или линз Люнеберга), апланатических и тд.

Таким образом, суть разработанной методики заключается в снижении УБЛ за счет выравнивания амплитудного распределения поля в раскрыве антенны. Это достигается благодаря использованию в линейной АР объединенных усеченных линзовых элементов (нерегулярная линза).

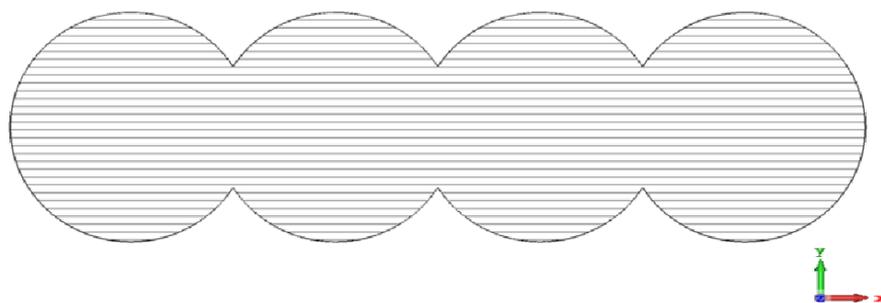
4.2.2. Исследование и разработка МЛА на основе нерегулярной линзы, состоящей из усеченных сферических антенн на основе однородного диэлектрика

В настоящем подразделе разработана и исследована МЛА на основе нерегулярной линзы, состоящей из 4 усеченных сфер из однородного сплошного пропилена ($\epsilon_r = 2,2$, $\text{tg}(\delta) = 0,0002$) [150].

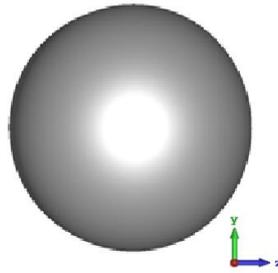
Расчетная масса линзы 14,9 кг. Геометрические параметры нерегулярной линзы:

- диаметр одного шара 200 мм;
- период расположения элементов АР 170 мм;
- общая длина 710 мм

На рисунке 4.2 показана нерегулярная линза из усеченных шаров, а на рисунке 4.3 приведен разрез в плоскости, проходящей через ось симметрии и внешний вид сбоку.



a) разрез в плоскости, проходящей через ось симметрии

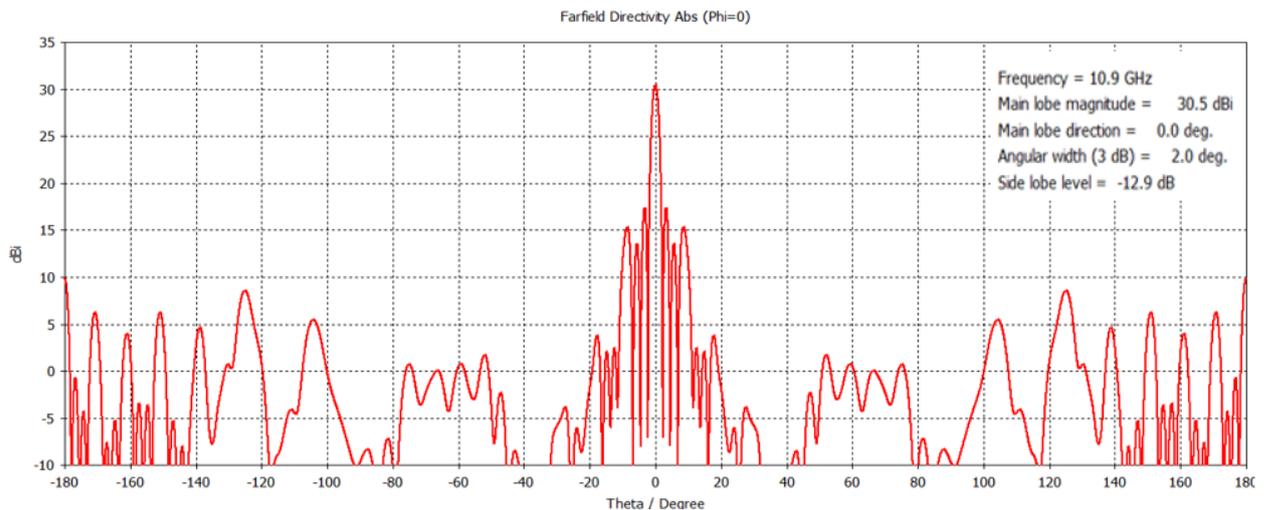


б) вид сбоку

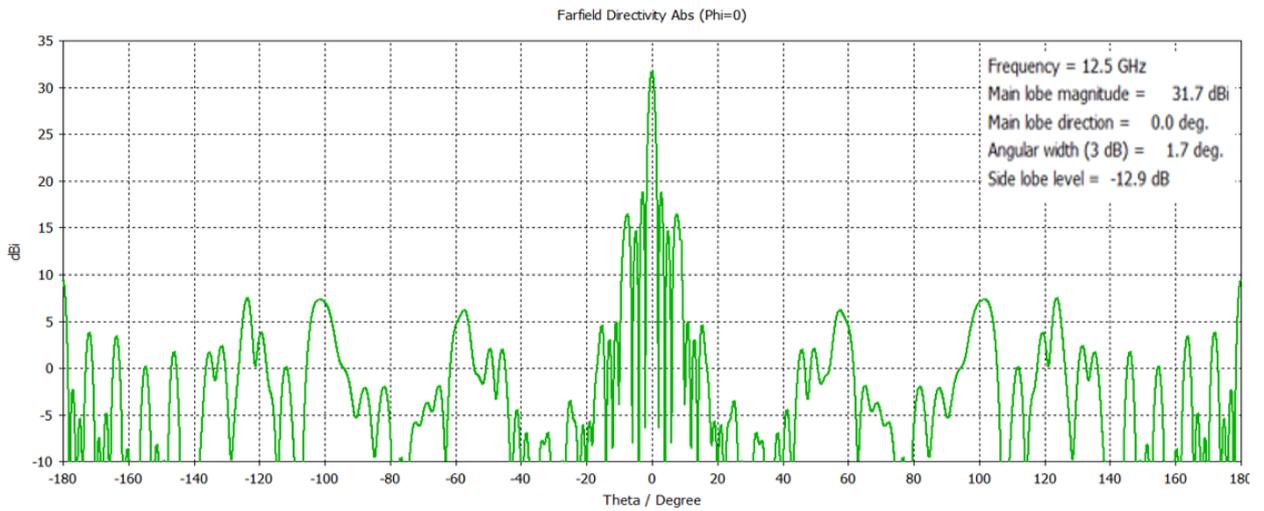
Рис. 4.3. Нерегулярная линза из однородного диэлектрика

Необходимо отметить, что из-за сферических элементов, состоящих из изотропного материала, а также осесимметричной конструкции, такая линза позволяет реализовать МЛА с двумя ортогональными поляризациями (линейная горизонтальная, вертикальная или $\pm 45^\circ$, левая или правая круговая).

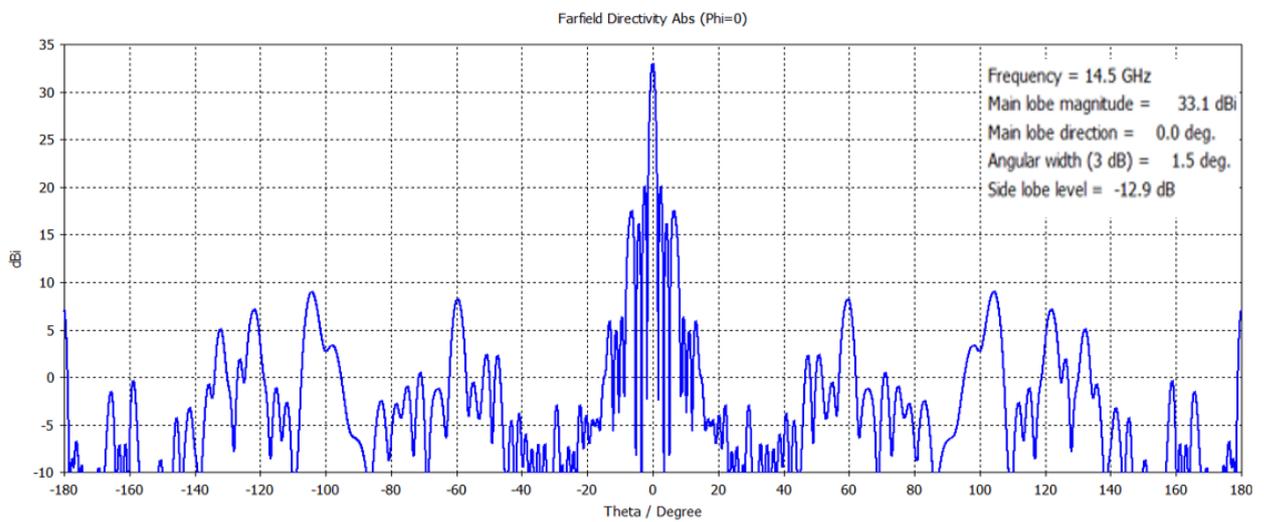
Рассмотрим направленные свойства антенной системы с линейной поляризацией на основе нерегулярной однородной линзы. В качестве облучателей используются вибраторы с рефлектором. На рисунке 4.4 показана ДН в азимутальной плоскости, на рисунке 4.5 – ДН в угломестной плоскости. ДН в объеме на частоте 10,9 ГГц показана на рисунке 4.6.



а) 10,9 ГГц



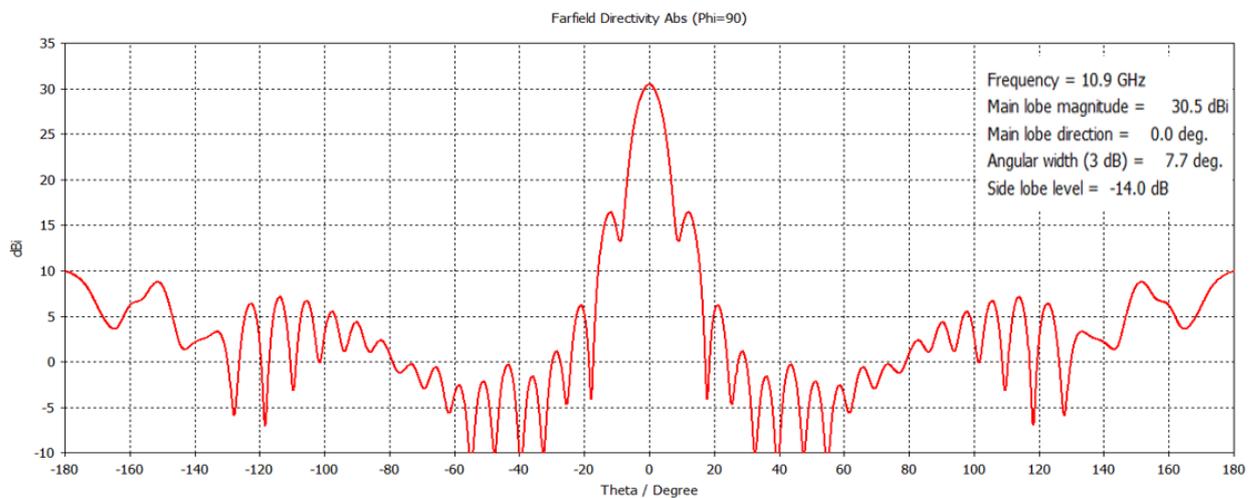
б) 12,5 ГГц



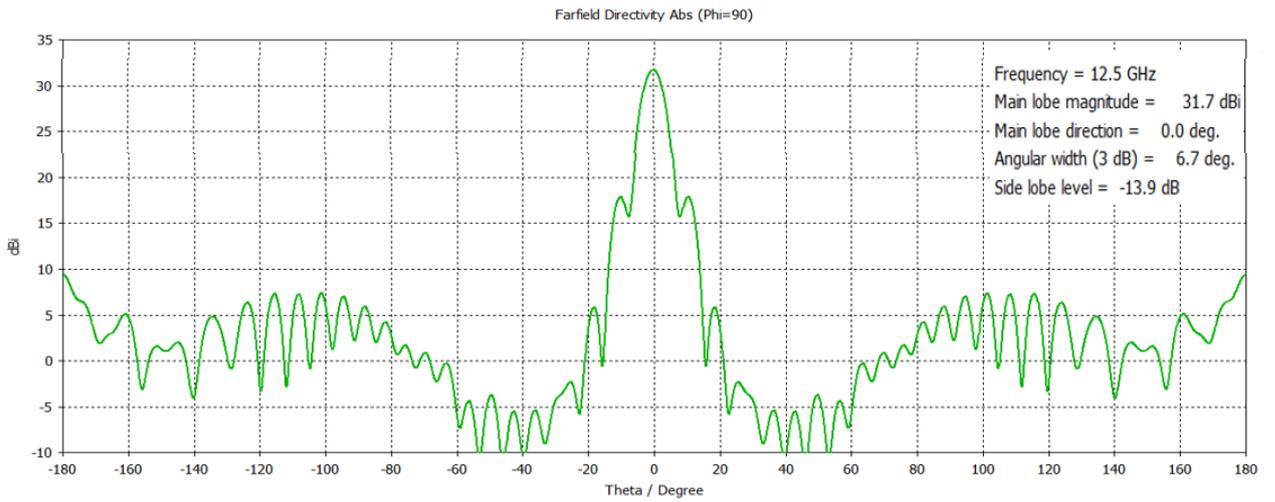
в) 14,5 ГГц

Рис. 4.4. ДН в азимутальной плоскости нерегулярной однородной

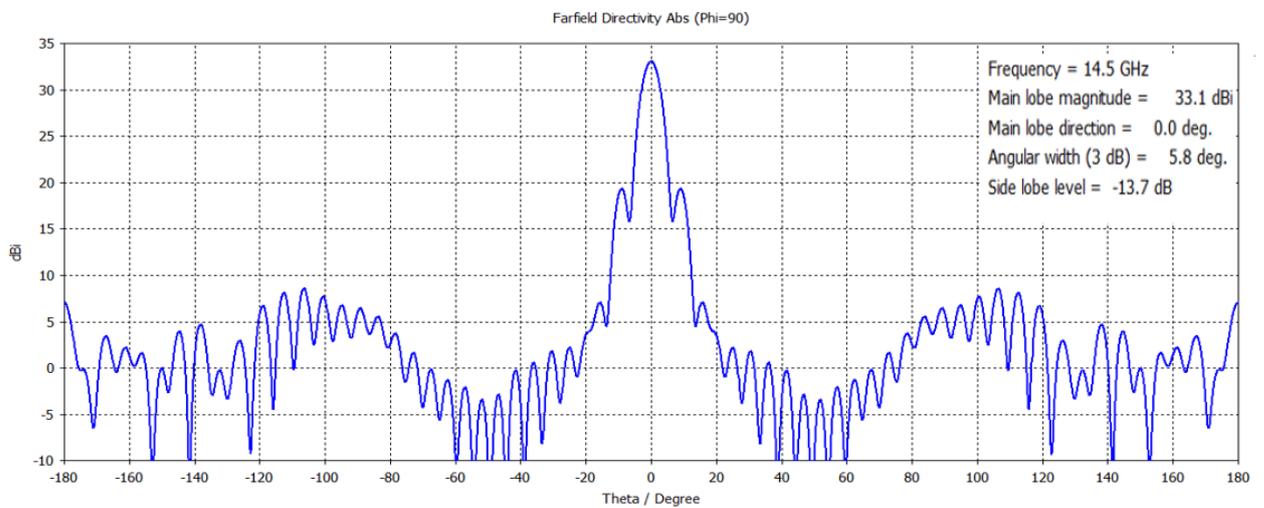
ЛИНЗЫ



а) 10,9 ГГц



б) 12,5 ГГц



в) 14,5 ГГц

Рис. 4.5. ДН в угломестной плоскости нерегулярной однородной линзы

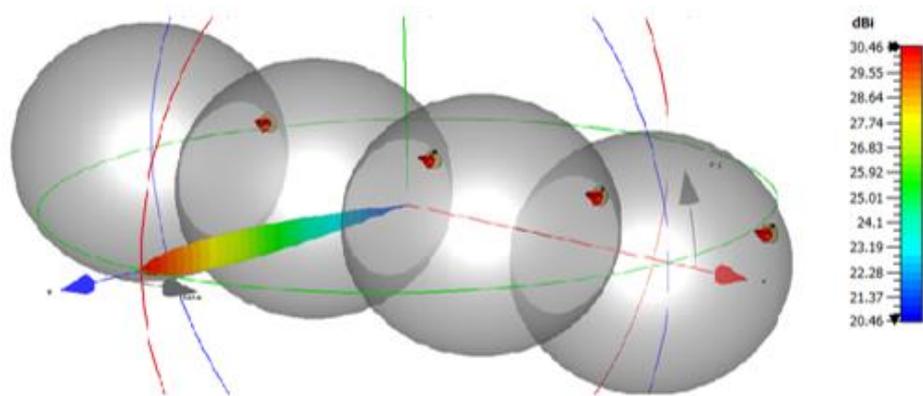


Рис. 4.6. ДН в объеме на частоте 10,9 ГГц нерегулярной однородной линзы

Анализ полученных результатов показал:

- в азимутальной плоскости максимальный УБЛ составляет -12,9 дБ, что близко к УБЛ синфазного равно амплитудного раскрыва (-13,2 дБ);
- в угломестной плоскости УБЛ не превышает -13,7 дБ;
- КНД возрастает с увеличением частоты, имея значение 33,1 дБи;
- КИП антенной системы 0,57.

Таким образом, в настоящем подразделе показано, что нерегулярная линза позволяет снизить УБЛ практически до -13,2 дБ. Это подтверждает достоверность разработанной методики снижения УБЛ: амплитудное распределение поля в раскрыве антенной системы близко к равномерному. Однако использование однородных диэлектриков приводит к существенному повышению массы всей антенной системы. Поэтому для снижения массы линзы вместо сплошного пропилена целесообразно использовать современные вспененные диэлектрические материалы или искусственные среды.

4.2.3. Нерегулярная линза, состоящая из усеченных линз Люнеберга

В данном подразделе разработана и исследована МЛА на основе нерегулярной линзы, состоящей из 4 усеченных линз Люнеберга [150].

В разделе 4.1 было показано, что направленные свойства АР зависят как от геометрии расположения излучателей, так и от свойств самих излучателей. Поэтому для повышения КНД и снижения УБЛ антенной системы на основе нерегулярной линзы, целесообразно использовать усеченные сферические линзы Люнеберга.

Сферические линзы Люнеберга могут быть как с оболочкой (внешним слоем), так и без нее. В качестве примера, на рисунке 4.7 показана нерегулярная линза на основе усеченных сферических линз Люнеберга с оболочкой. На рисунке 4.8 показана объемная ДН на частоте 10,9 ГГц.

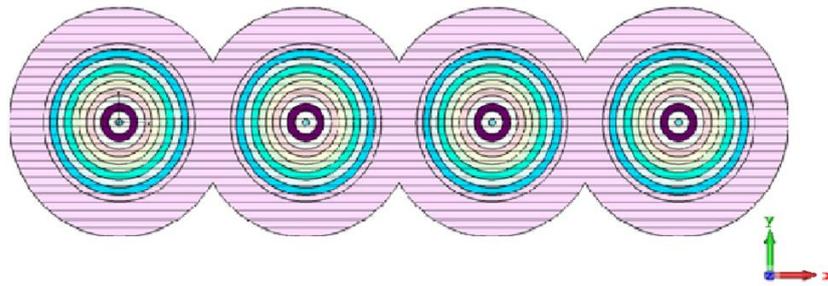


Рис. 4.7. Нерегулярная линза, состоящая из усеченных линз Люнеберга с оболочкой

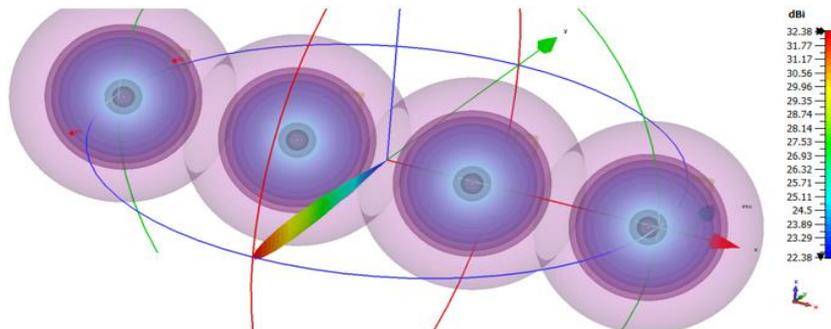


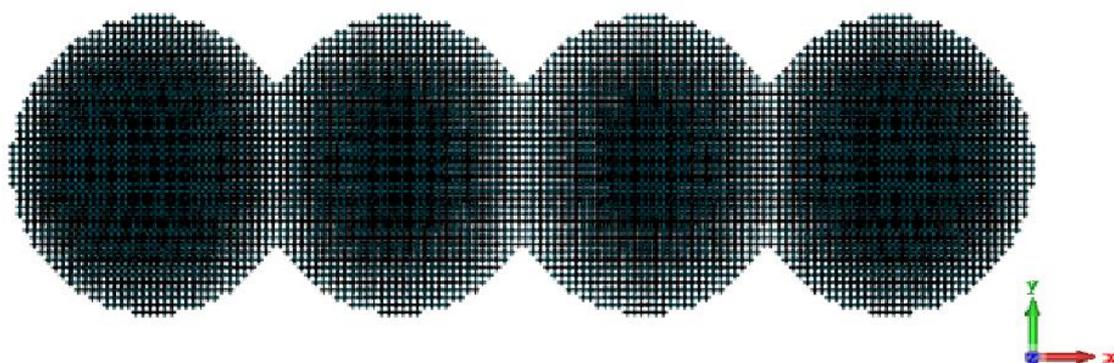
Рис. 4.8. ДН в объеме на частоте 10,9 ГГц нерегулярной линзы, состоящей из усеченных линз Люнеберга

Из результатов моделирования, приведенных на рисунке 4.8, следует, что КНД антенной системы, созданной на основе нерегулярной линзы из усеченных линз Люнеберга с оболочкой, больше на 1,92 дБ, чем КНД изотропного варианта (рисунок 4.6) при одинаковых геометрических параметрах.

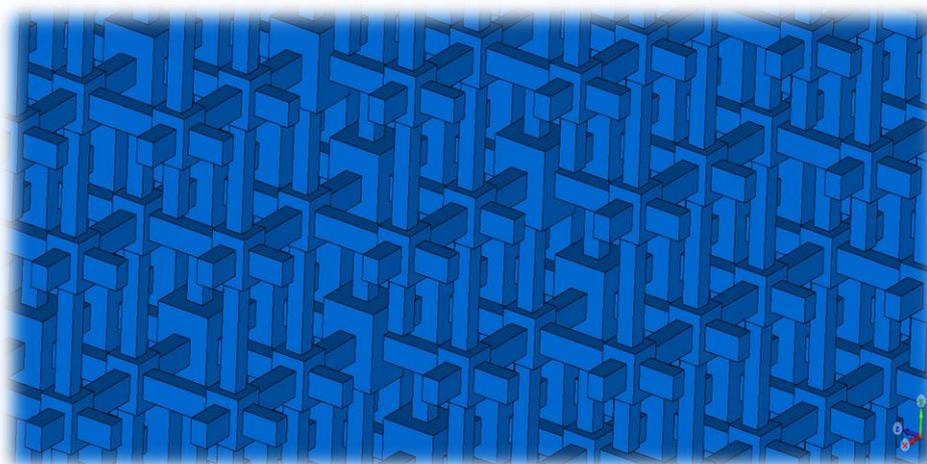
Рассмотрим вариант построения нерегулярной линзы на основе усеченных линз Люнеберга с классическим законом изменения n (соотношение (1.3)). Для существенного снижения массы антенной системы, линзы Люнеберга выполнены из искусственного диэлектрика с частичным воздушным заполнением. Внешний вид периодической структуры показан на рисунке 3.19, а одиночная сферическая линза на основе такой структуры описана в разделе 3.3. Из-за отсутствия анизотропии у данной искусственной

среды, возможна реализация в сканирующих лучах ДН МЛЛ как линейной поляризации (горизонтальная, вертикальная или $\pm 45^\circ$), так и круговой.

Геометрические параметры исследуемой нерегулярной линзы такие же, как и у однородной линзы из подраздела 4.2.2. Внешний вид линзы показан на рисунке 4.9(а), а на рисунке 4.9(б) показан печатный фрагмент. Расчетная масса линзы составляет менее 6 кг, что более чем в два раза меньше однородного варианта.



а) внешний вид

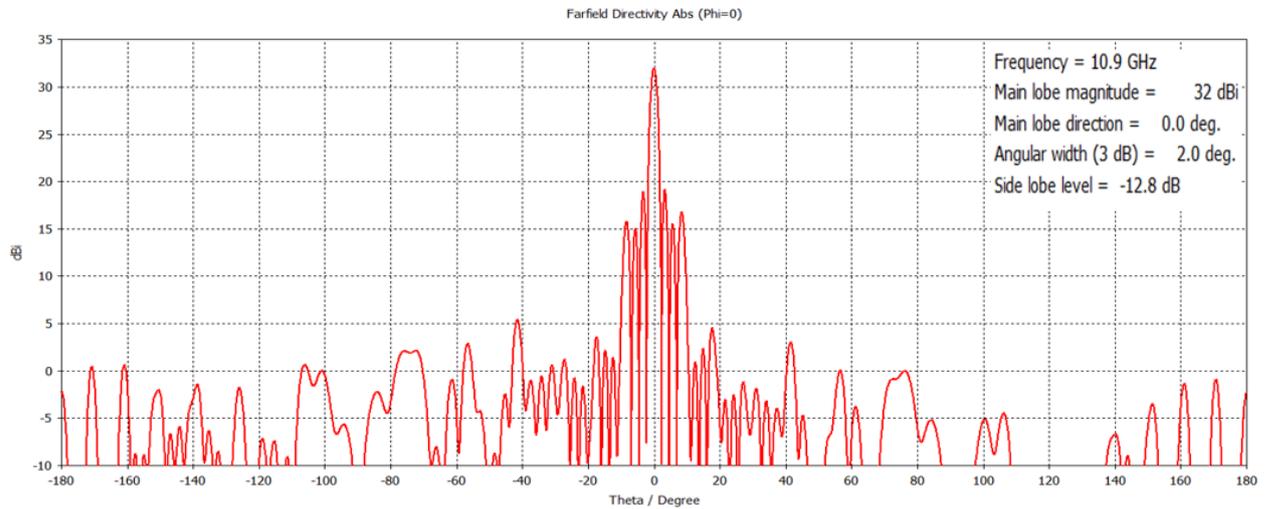


б) печатный фрагмент

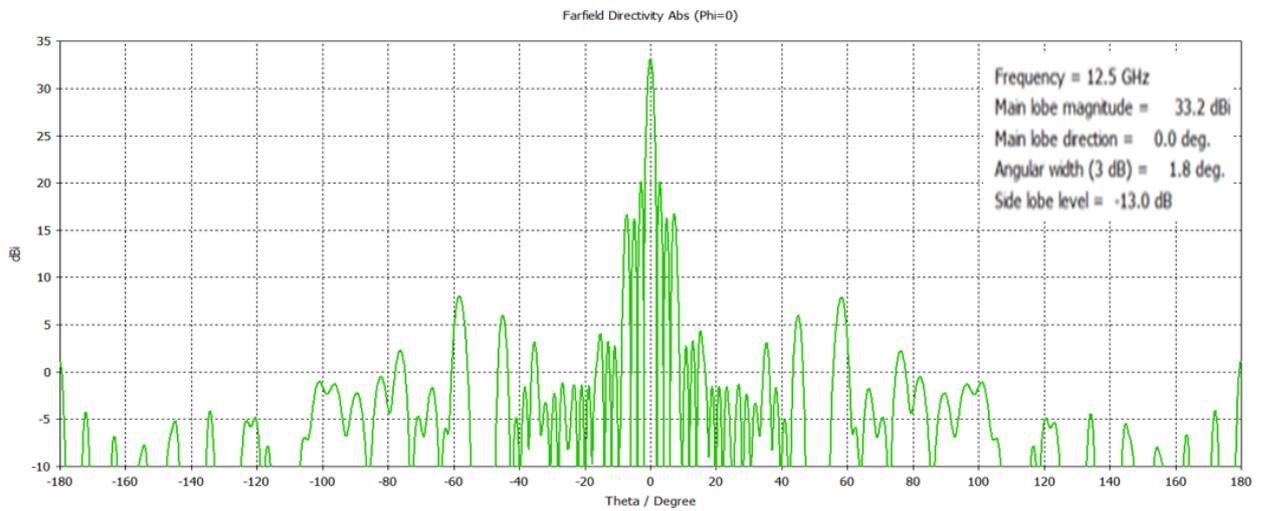
Рис. 4.9. Нерегулярная линза, состоящая из усеченных линз Люнеберга (технология трехмерной печати)

Рассмотрим направленные свойства антенной системы с линейной поляризацией на основе нерегулярной линзы. В качестве облучателей используются вибраторы с рефлектором. На рисунке 4.10 показана ДН в

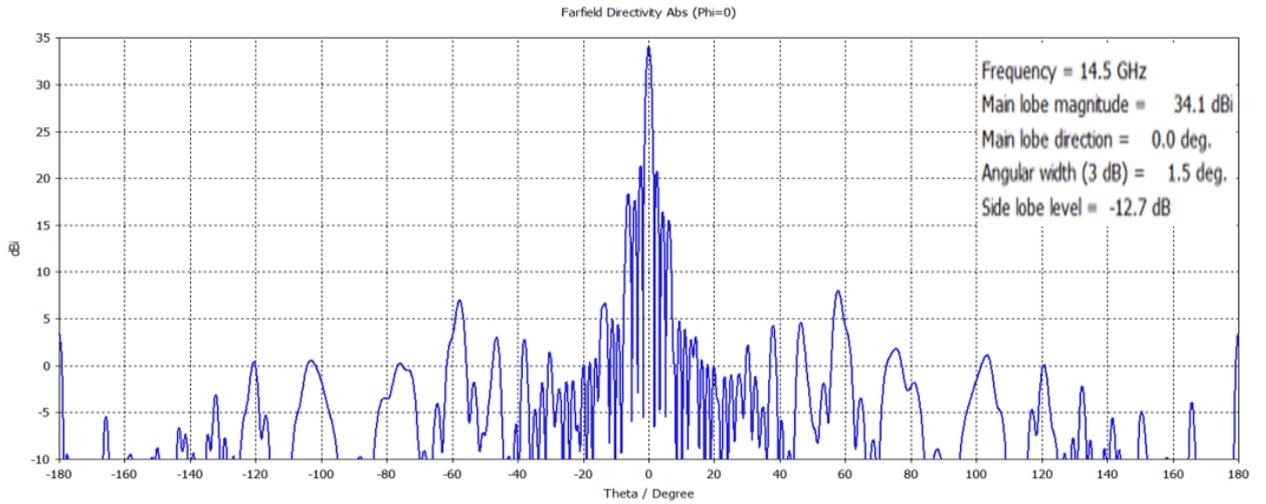
азимутальной плоскости, на рисунке 4.11 – ДН в угломестной плоскости. ДН в объеме на частоте 10,9 ГГц показана на рисунке 4.12.



а) 10,9 ГГц

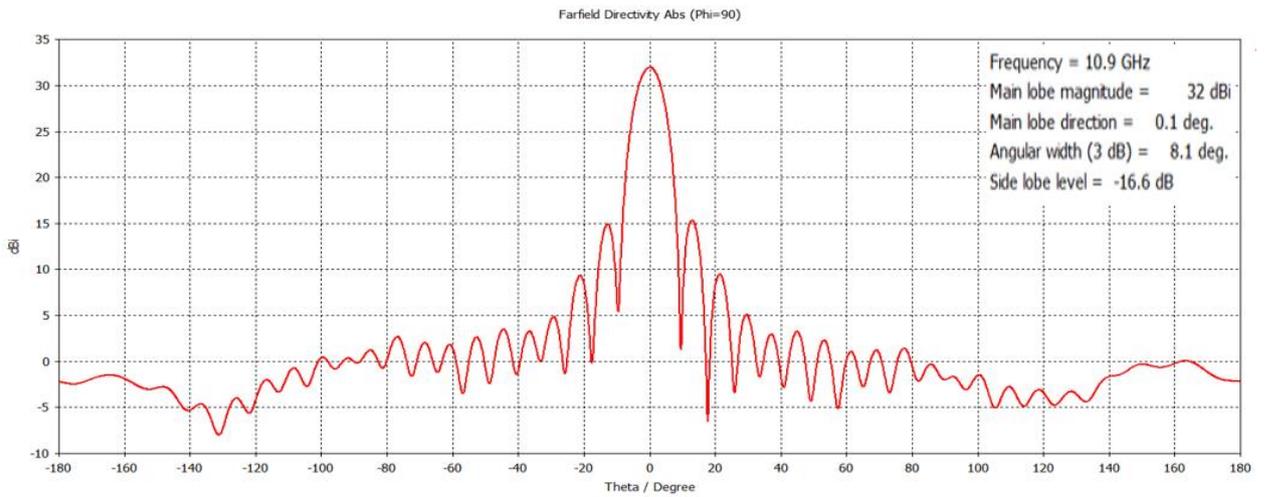


б) 12,5 ГГц

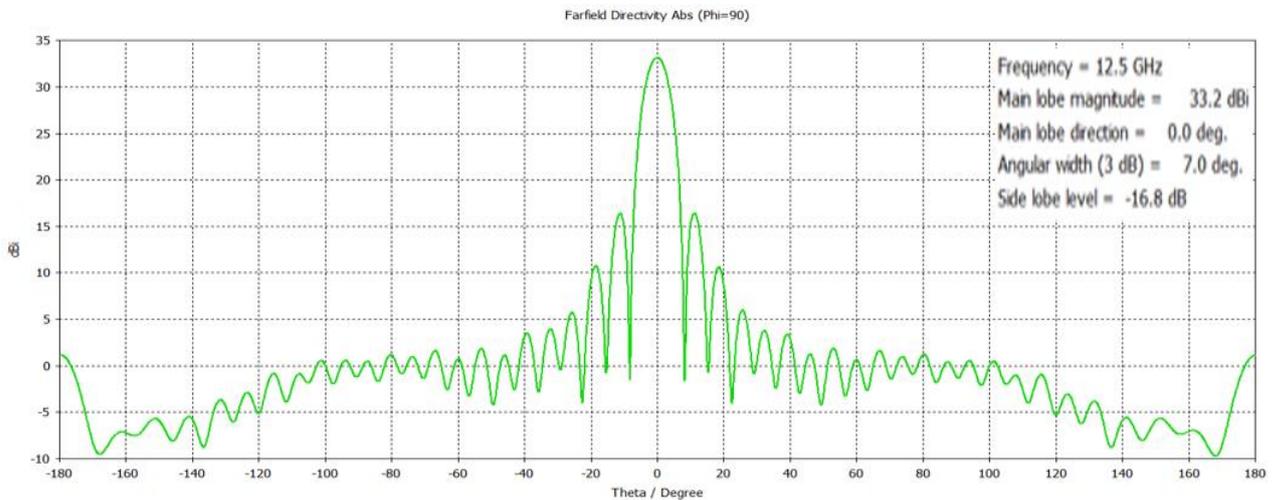


в) 14,5 ГГц

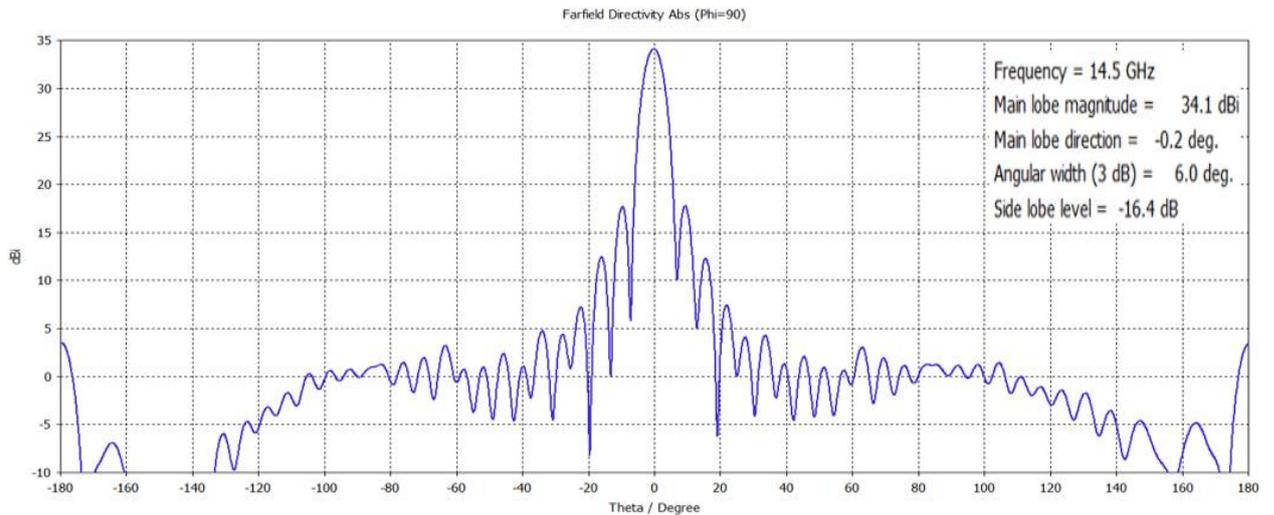
Рис. 4.10. ДН в азимутальной плоскости нерегулярной однородной
 ЛИНЗЫ



а) 10,9 ГГц



б) 12,5 ГГц



е) 14,5 ГГц

Рис. 4.11. ДН в угломестной плоскости нерегулярной линзы на основе усеченных линз Люнеберга

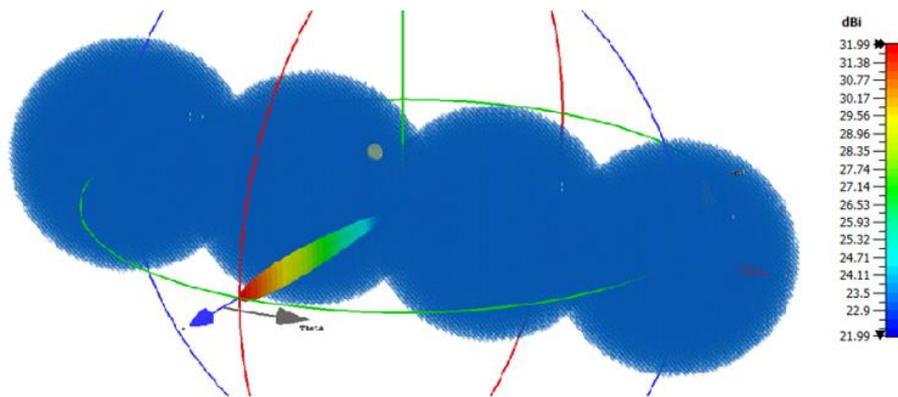


Рис. 4.12. ДН в объеме на частоте 10,9 ГГц нерегулярной линзы на основе усеченных линз Люнеберга

Из полученных результатов следует:

- максимальное значение УБЛ в азимутальной плоскости составляет - 12,7 дБ, что на 0,5 дБ больше, чем УБЛ равноамплитудного раскрыва (вероятно, из-за неоптимальной формы облучателей);
- в угломестной плоскости УБЛ не превышает - 16,9 дБ;
- КНД возрастает с увеличением частоты, имея максимальное значение 34,1 дБи.
- КИП имеет минимальное значение 0,73, максимальное – 0,8.

Сравним направленные характеристики антенной системы на основе однородной линзы (рисунок 4.3) и, состоящей из усеченных линз Люнеберга (рисунок 4.9). В таблице 2 приведены направленные характеристики исследуемых антенных систем.

Таблица 2. Направленные характеристики антенных систем на основе нерегулярных линз

Тип линзы	частота, ГГц	УБЛ		КНД, дБи	КИП
		азимутальная плоскость	угломестная плоскость		
однородный диэлектрик	10,9	-12,9	-14,0	30,46	0,57
	12,5	-12,9	-13,9	31,7	0,57
	14,5	-12,9	-13,7	33,07	0,58
усеченные линзы Люнеберга	10,9	-12,8	-16,6	32	0,8
	12,5	-13,0	-16,8	33,17	0,8
	14,5	-12,7	-16,4	34,12	0,73

Из представленных в таблице 2 результатов следует, что у нерегулярной линзы на основе усеченных линз Люнеберга:

- КНД на 1-2 дБ выше, чем у однородной линзы;
- возрос КИП, имея минимальное значение 0,73, тогда как у однородной линзы КИП составляет 0,58;
- максимум УБЛ в азимутальной плоскости не превышает -12,7 дБ, что на 0,2 дБ больше, чем у однородной линзы, вероятно, из-за неоптимальной формы облучателей;
- значительно снизился УБЛ в угломестной плоскости (на 2-3 дБ): максимальное значение не превышает -16,8 дБ, тогда как у однородной линзы УБЛ не превышает -13,9 дБ.

Таким образом, использование усеченных сферических линз Люнеберга позволяет улучшить направленные характеристики антенной системы на основе нерегулярной линзы и значительно снизить ее массу по сравнению с однородным вариантом. Однако, из-за неоптимальной формы облучателей, у разработанной антенной системы УБЛ в азимутальной плоскости выше на 0,2 дБ, чем у однородной линзы. Необходимо отметить, что из-за

использования линз Люнеберга усложняется конструкция и возрастает стоимость нерегулярной линзы.

4.3. Исследование и разработка многолучевых антенных систем на основе нерегулярной линзы для мобильного терминала спутниковой связи

В данном разделе разработаны и исследованы антенные системы для мобильного терминала спутниковой связи с возможностью механического управления линейной поляризацией на основе нерегулярной линзы, состоящей из линзовых антенн различных конструкций: плоские печатные линзы (на основе многослойной печатной платы); линзовые антенны из однородного диэлектрика, обладающих высокими значениями КИП [151, 152]. Для численного трехмерного электромагнитного моделирования используется метод Вейланда [129-131].

4.3.1. Разработка диаграммообразующего волноводного тракта

Мобильные терминалы спутниковой связи принимают слабые сигналы с произвольно изменяющейся поляризацией. Поэтому антенные системы, используемые в таких системах связи, должны иметь возможность управлением поляризацией. В самом простом случае, такое управление может осуществляться механически.

В настоящем подразделе разработан диаграммообразующий тракт (ДОТ) на основе волноводного (волноводы типа WR-75 (19x9.5 мм)) 6 дБ делителя мощности с возможностью механического управления линейной поляризацией.

Для улучшения направленных свойств линзовых излучателей нерегулярной линзы, в качестве облучателей линз используются направленные облучатели – конические рупорные антенны. Рупорная антенна возбуждается щелевой антенной с экспоненциально расширяющейся щелью (антенна Вивальди). Тыльная сторона антенны Вивальди упирается в закороченную стенку круглого волновода, в центре которой проделано

круглое отверстие. Для возбуждения щелевой антенны используется металлический штырь коаксиально-волноводного перехода, закороченный на одну из металлических сторон щели. Механическое управление линейной поляризацией достигается за счет использования коаксиально-волноводного перехода (отверстие в широкой стенке волновода), запитывающего рупорный излучатель. На рисунке 4.13 показано сечение одиночного излучателя с коаксиально-волноводной запиткой (поляризатор).

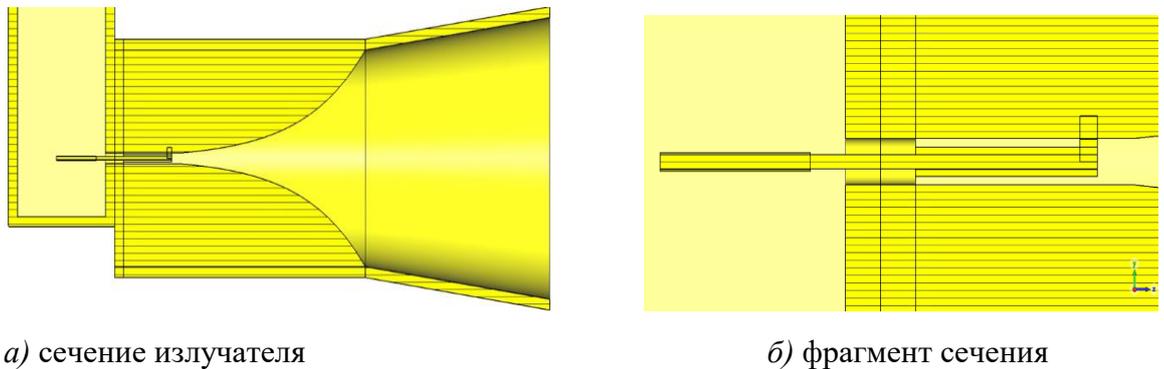


Рис. 4.13. Сечение одиночного излучателя

Поляризатор подключается к выходам 6 дБ волноводного делителя мощности. Период расположения излучателей – 170 мм. На рисунке 4.14 показан внешний вид ДОТ.

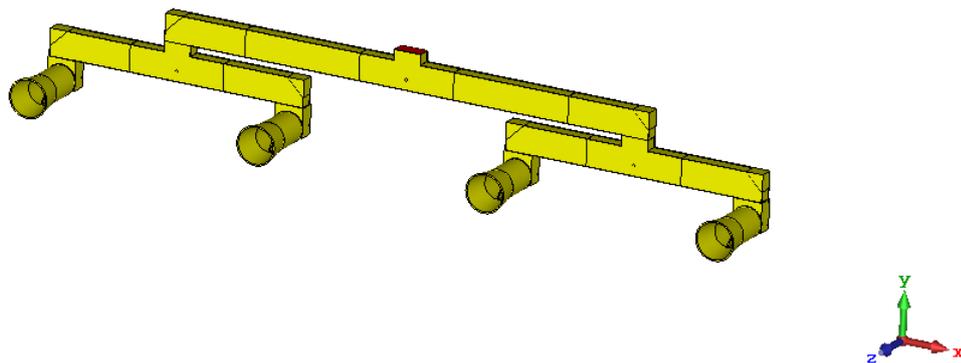


Рис. 4.14. ДОТ с механическим управлением линейной поляризаций на основе 6 дБ волноводного делителя мощности

На рисунке 4.15 показана зависимость КСВН ДОТ от частоты.

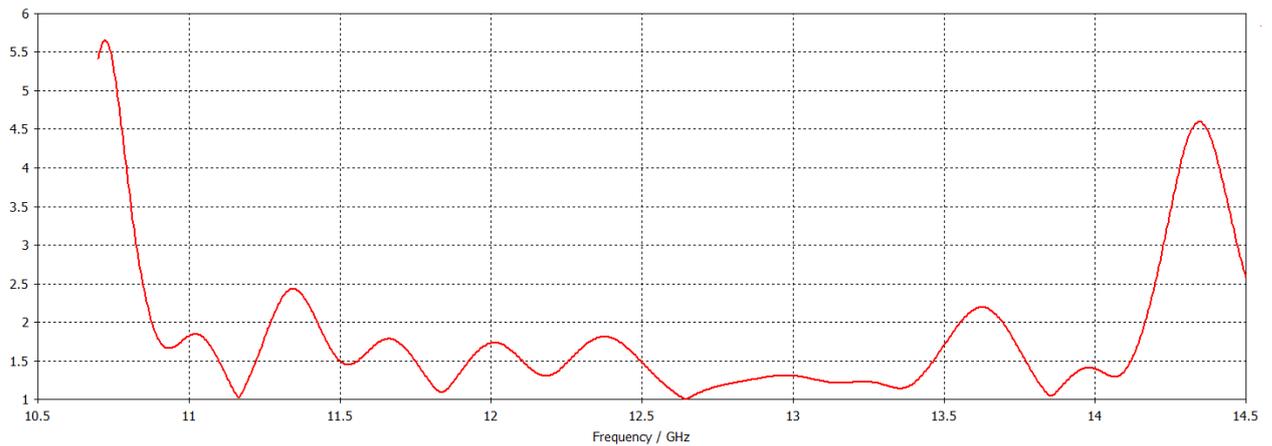


Рис. 4.15. Зависимость КСВН ДОТ от частоты

Из анализа полученной зависимости следует, что ДОТ работает в диапазоне 10,7-14,2 ГГц по уровню КСВН ниже 2,5.

Таким образом, в настоящем подразделе разработан простой в изготовлении ДОТ с возможностью механического управления линейно поляризации на основе 6 дБ волноводного делителя мощности.

4.3.2. Разработка и исследование синфазной печатной антенной решетки с механическим управлением линейной поляризацией для мобильного терминала спутниковой связи

В подразделе 4.2.1 указано, что элементами нерегулярной линзы могут быть линзовые антенны различных типов. Использование плоских печатных линз, аналогичных разработанной линзе из подраздела 2.6, позволит существенно снизить массу линзы и продольные габариты; реализовать линейную (горизонтальную и/или вертикальную) или круговую поляризацию, при этом облучатели линзы имеют линейную поляризацию; плоский профиль линзы делает ее удобной для размещения на борту транспортного средства или для использования в портативных системах связи.

В данном подразделе разработана и исследована синфазная АР с механическим управлением линейной поляризации для мобильного терминала спутниковой связи Ку-диапазона, состоящая из 4 усеченных печатных линз диаметром 200 мм каждая, внешними и внутренними элементами которой

являются круглые патч-антенны с двумя ортогональными линейными поляризациями.

Разрабатываемая нерегулярная линза состоит из 4 усеченных линз диаметром 200 мм и периодом расположения 170 мм. Общая длина антенной системы – 710 мм.

В качестве элементов нерегулярной линзы используются плоские печатные линзы, аналогичные линзе из раздела 2.6, но без полоскового квадратурного (90^0) делителя мощности, необходимого для реализации круговой поляризации. Многослойная печатная плата линз состоит из следующих слоев, разделенных между собой слоями металла (заземления):

5. круглые патчи теневой стороны линзы с ортогональной запиткой;
6. 50 Ом полосковые линии задержки в форме полукруга или дуги окружности;
7. круглые патчи облучаемой стороны линзы с ортогональной запиткой.

Для контактного соединения элементов, расположенных в разных слоях многослойной печатной платы, используются штырьки (пины). Подобный способ соединения описан в разделе 1.4 и схематично показан на рисунке 1.25. В многослойной печатной плате используется высокочастотный диэлектрик марки Rogers 3003 ($\epsilon_r = 3$ и $tg(\delta) = 0,001$). Суммарная толщина многослойной печатной платы менее 1 мм. Фокусное расстояние равно диаметру (200 мм). На рисунке 4.16 показан фрагмент печатной линзы с удаленными слоями диэлектрика и заземления.

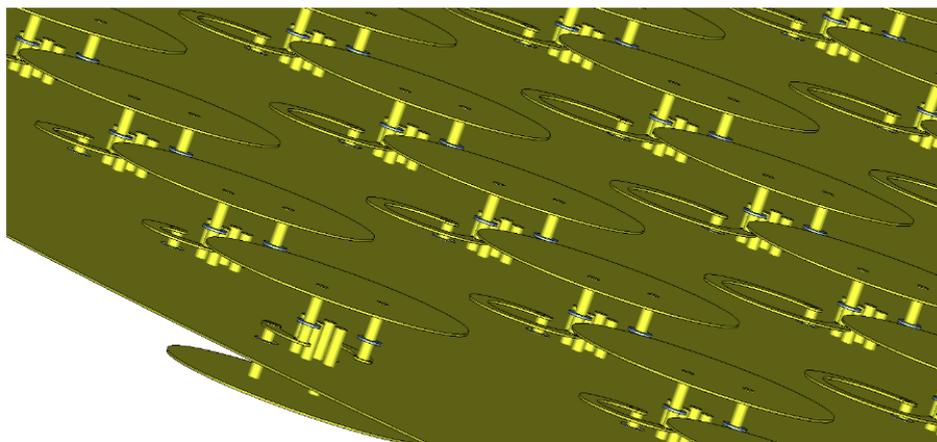


Рис. 4.16. Фрагмент печатной линзы с удаленными слоями диэлектрика и заземления

На рисунке 4.17 показан внешний вид исследуемой антенной системы. Нерегулярная печатная линза облучается ДОТ с механическим управлением линейной поляризации, описанным в подразделе 4.3.1.

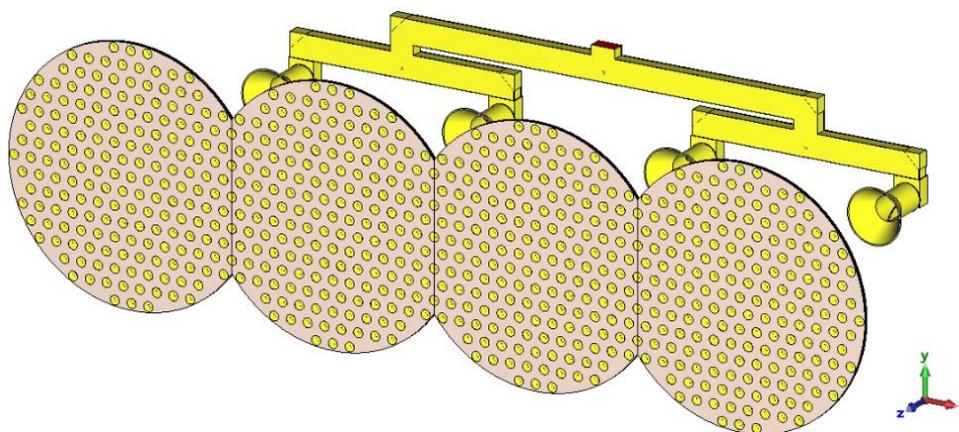


Рис. 4.17. Антенная система на основе печатной нерегулярной линзы

Рассмотрим направленные и частотные свойства антенной системы. На рисунке 4.18 приведена зависимость коэффициента усиления (КУ) от частоты. На рисунке 4.19 показаны ДН в азимутальной плоскости (плоскость AP). Входные характеристики антенной системы приведены на рисунке 4.20. Потери антенной системы показаны на рисунке 4.21.

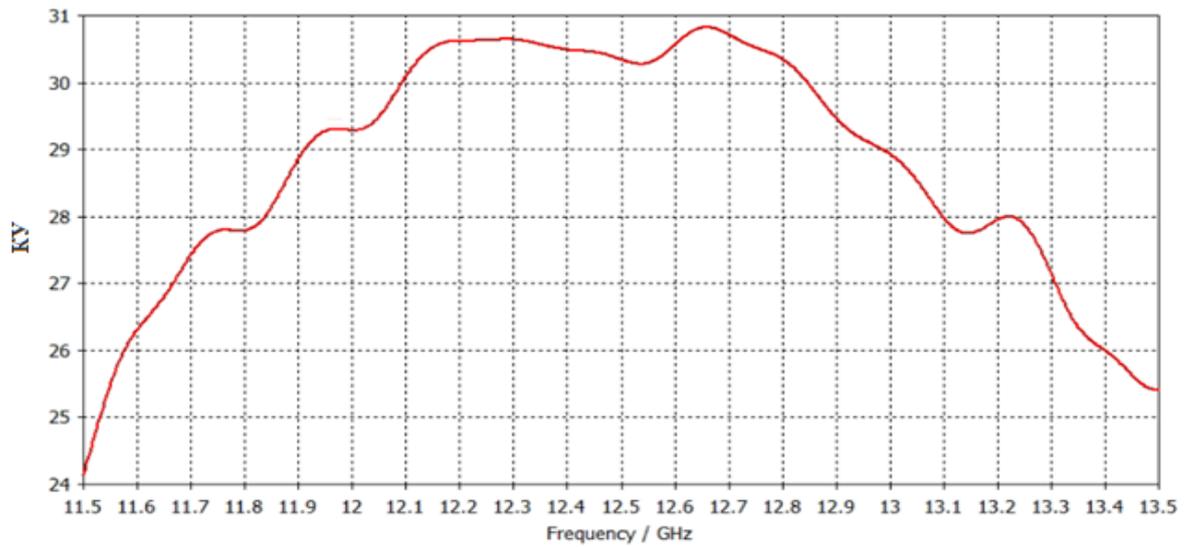
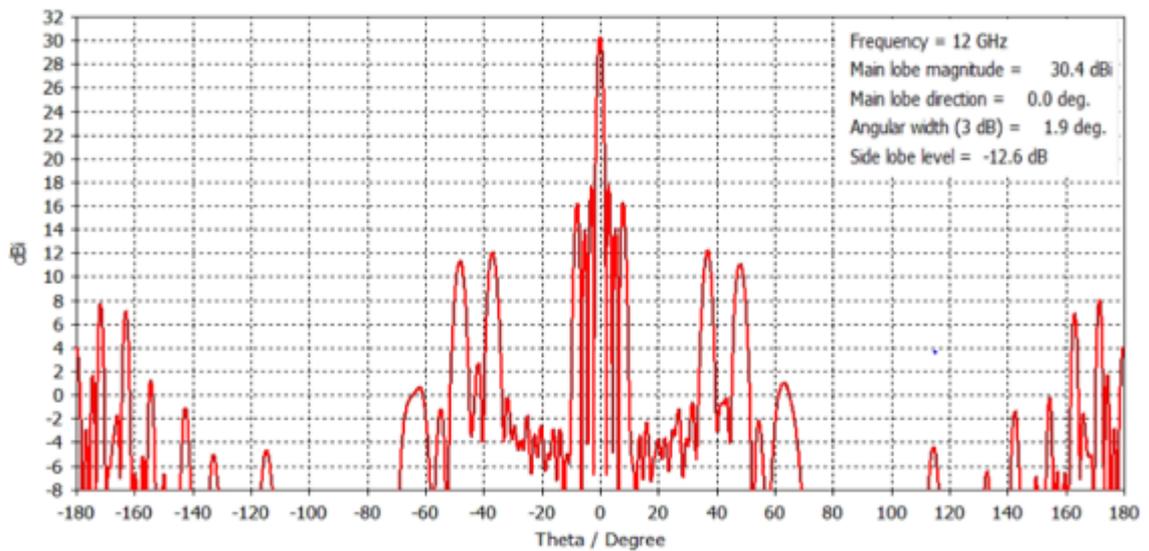
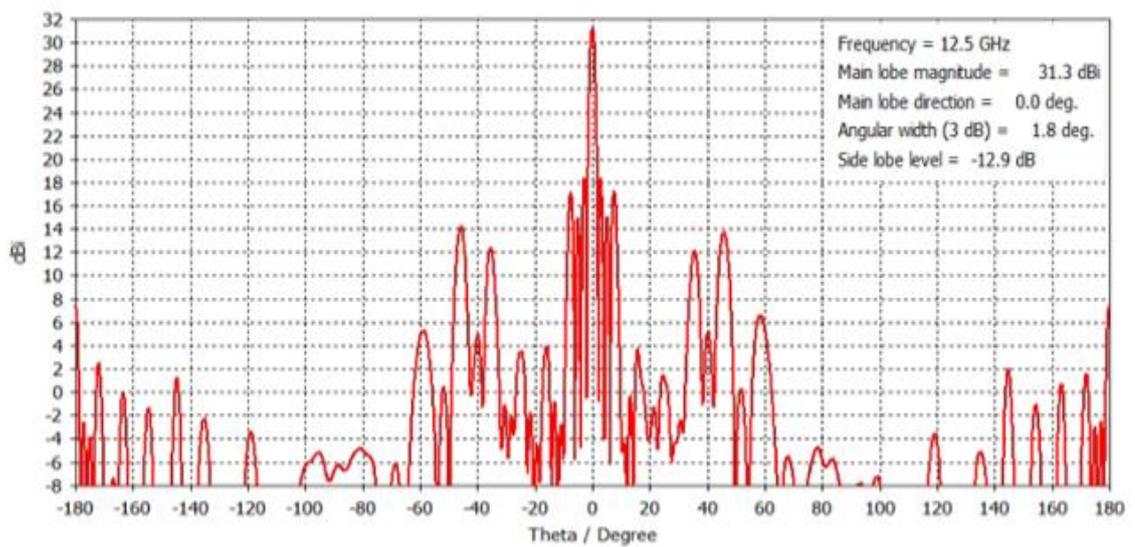


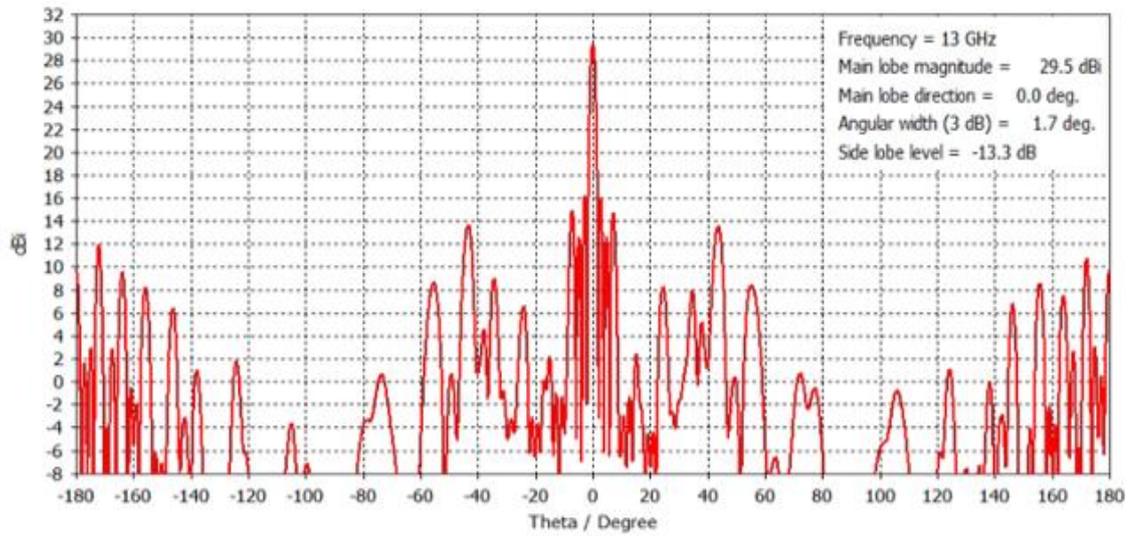
Рис. 4.18. Зависимость КУ от частоты



а) 12 ГГц



б) 12.5 ГГц



в) 13 ГГц

Рис. 4.19. ДН в азимутальной плоскости печатной нерегулярной линзы

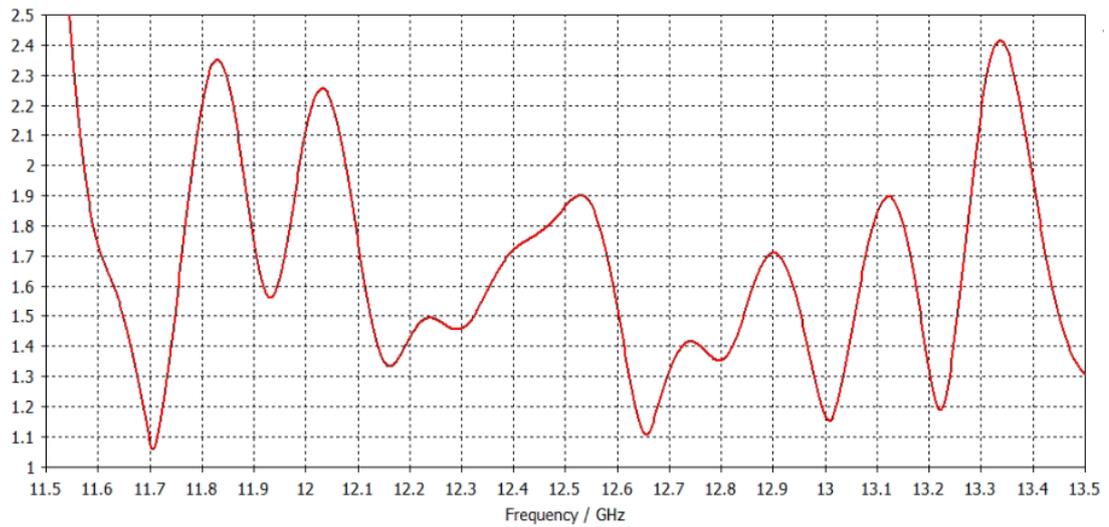


Рис. 4.20. Зависимость КСВН от частоты

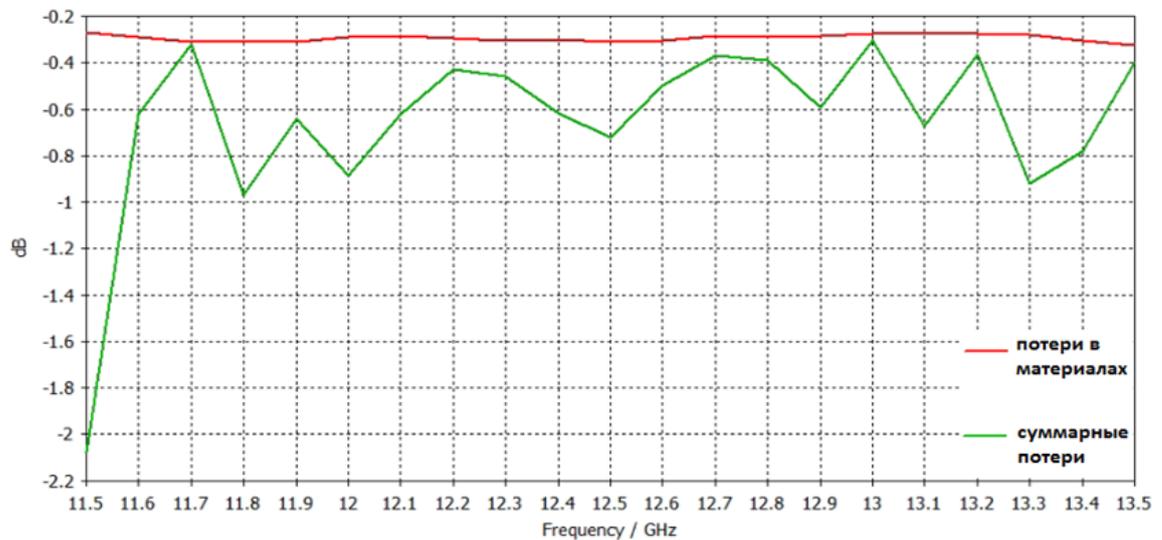


Рис. 4.21. Потери в антенной системе

Анализ полученных результатов показал:

- максимальное значение КУ 30,7 дБи;
- из-за узкополосных печатных круглых патчей КУ больше 29 дБи только в диапазоне 11,9-13 ГГц, вне этого диапазона КУ резко убывает с изменением частоты;
- рабочая полоса антенной системы 12-13 ГГц;
- коэффициент использования поверхности (КИП) имеет максимальное значение равное 0,54.
- максимум УБЛ в азимутальной плоскости -12,6 дБ, что на 0,5 дБ больше, чем у синфазного равноамплитудного раскрыва;
- КСВН в рабочей полосе не более 2,3;
- суммарные потери (с учетом согласования) менее 1 дБ.

ДН в объеме на частоте 12,2 ГГц показана на рисунке 4.22.

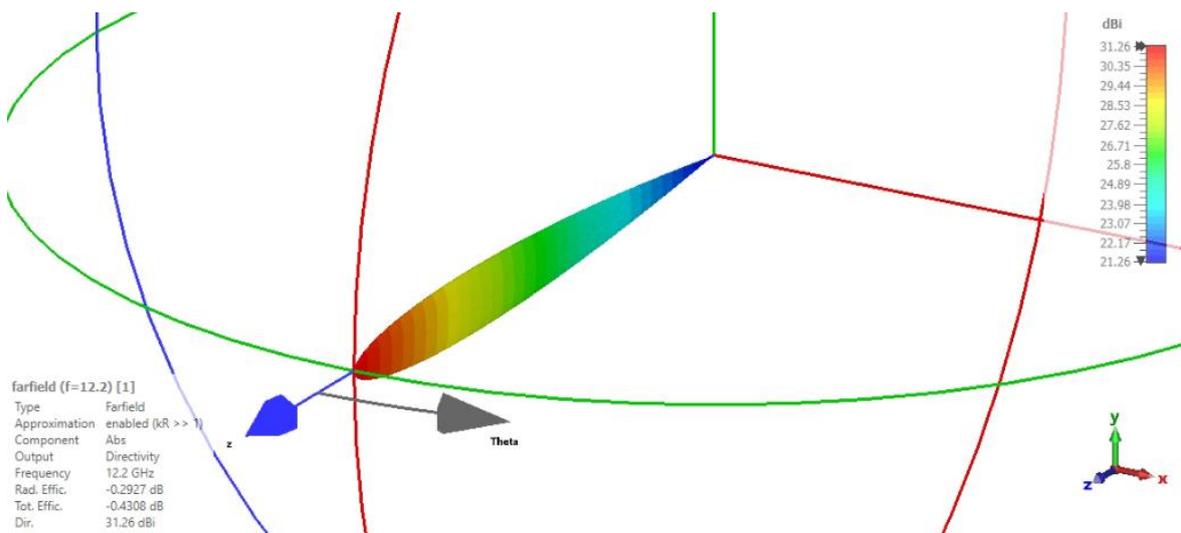


Рис. 4.22. ДН в объеме на частоте 12,2 ГГц антенной системы на основе печатной нерегулярной линзы

Таким образом, в настоящем подразделе разработана и исследована нерегулярная линза на основе усеченных планарных печатных линзовых антенн. Антенная система функционирует в диапазоне частот 12-13 ГГц на двух ортогональных поляризациях. Максимум УБЛ в азимутальной плоскости на 0,5 дБ больше УБЛ синфазного равноамплитудного раскрыва. Суммарные

потери (с учетом согласования) менее 1 дБ. Благодаря тонкому плоскому профилю линзы, разработанная антенная система обладает небольшой массой и удобна для размещения на борту транспортных средств или для использования в мобильных терминалах спутниковой связи.

4.3.3. Разработка и исследование синфазной антенной решетки на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика для мобильного терминала спутниковой связи

Для повышения КНД нерегулярной линзы целесообразно использовать линзовые антенны, имеющие высокие значения КИП. В подразделе 4.2.3 показано, что использование линз Люнеберга позволило повысить КНД антенной системы по сравнению с нерегулярной линзой, состоящей из однородных сфер. При этом существенно возросла сложность изготовления, а, следовательно, и стоимость линзы.

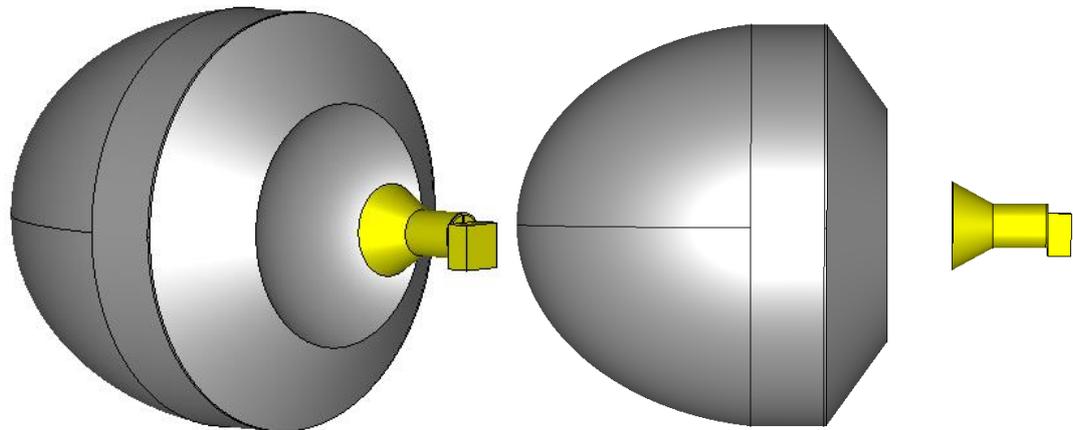
Если массогабаритные ограничения не являются первостепенными, а стоит задача существенно снизить стоимость антенной системы при сохранении высоких направленных свойств, целесообразно использовать линзовые антенны из однородного диэлектрика с высокими значениями КИП.

В данном подразделе разработана и исследована антенная система с механическим управлением линейной поляризацией на основе нерегулярной линзы, состоящей из линзовых антенн с облучаемой сферической и теневой эллиптической стороной из однородного диэлектрика.

Геометрические параметры исследуемой нерегулярной линзы такие же, как и у однородной линзы из подраздела 4.2.2.

В качестве элементов нерегулярной линзы используются линзовые антенны из однородного полистирола ($\epsilon_r = 2,55$, $\text{tg}(\delta) = 0,0007$). Каждая часть линзы вырезается на токарном станке. Теневая сторона – эллипсоид вращения (меньший радиус эллипсоида 100 мм, больший радиус эллипсоида 128 мм). Облучаемая сторона – сфера радиусом 72 мм. С облучаемой стороны эллипсоид обрезан конусом с диаметром основания 100 мм. На рисунке 4.22

показан внешний вид одиночной линзы с облучателем (внешний вид облучателя показан на рисунке 4.12).

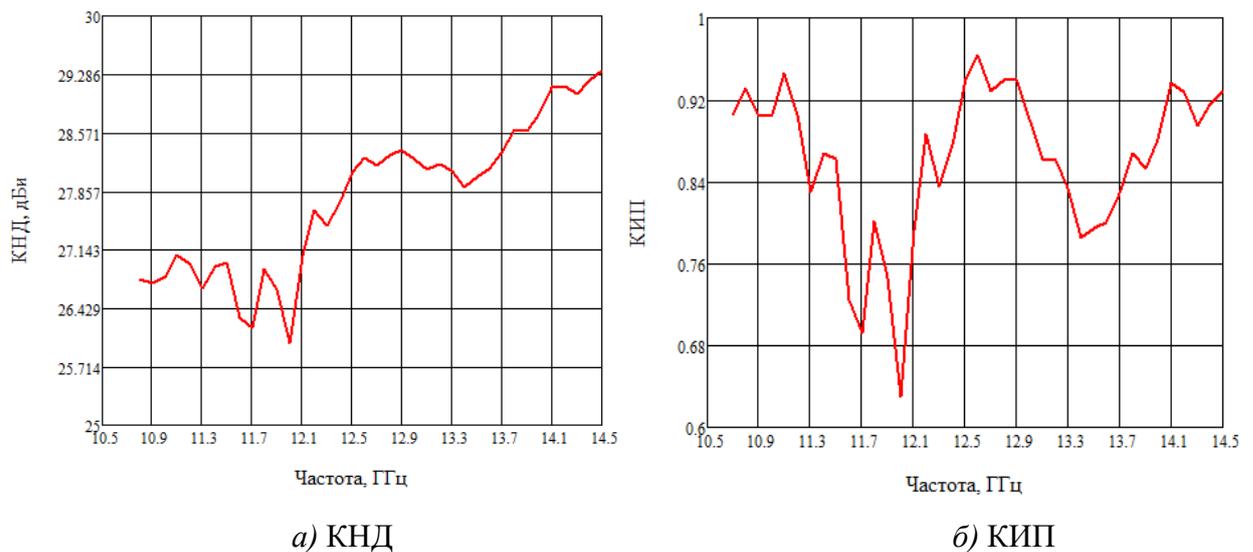


а) общий вид

б) вид сбоку

Рис. 4.23. Внешний вид линзы с облучателем

Рассмотрим частотные зависимости КНД и КИП однородной линзовой антенны (рисунок 4.24).



а) КНД

б) КИП

Рис. 4.24. Зависимость от частоты КНД и КИП

Анализ полученных зависимей показала, что в диапазоне 10,5-14,7 ГГц:

- КНД изменяется от 26 дБи до 29,3 дБи;
- КИП ниже 0,76 в диапазоне 11,56-12 ГГц (минимальное значение составляет 0,63), в остальном рабочем диапазоне КИП превышает 0,76, имея максимальное значение 0,964.

Следовательно, линзовая антенная с облучаемой сферической и теневой эллиптической стороной из однородного диэлектрика в диапазоне 10,5-14,7 ГГц имеет схожие значения КНД и КИП со сферическими линзами Люнеберга, описанными в разделах 3.2 и 3.3.

На рисунке 4.25 показан внешний вид исследуемой антенной системы. Нерегулярная линза облучается ДОТ с механическим управлением линейной поляризации, описанным в подразделе 4.3.1. Расчетная масса нерегулярной линзы (без учета ДОТ) 13,7 кг.

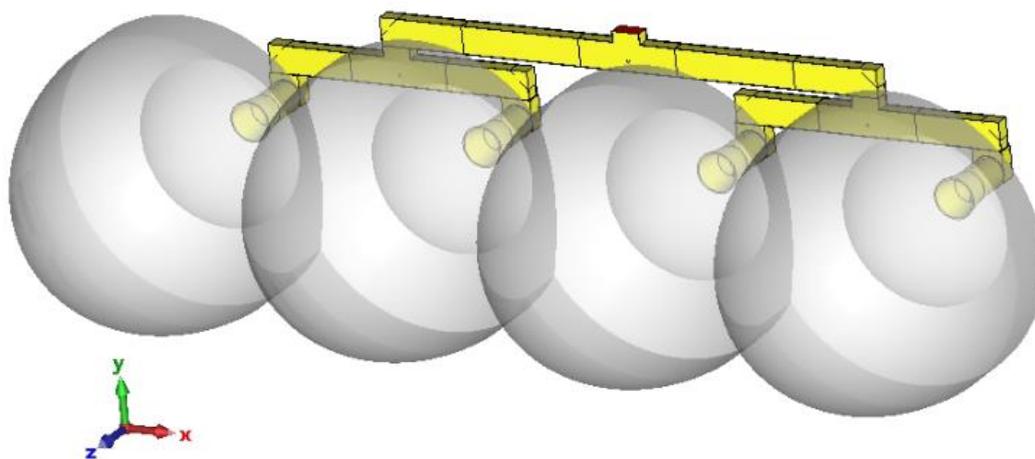


Рис. 4.25. Антенная система на основе однородной нерегулярной линзы

Рассмотрим направленные и частотные свойства антенной системы. На рисунке 4.26 приведена зависимость КУ от частоты. На рисунке 4.27 показаны ДН в азимутальной плоскости (плоскость АР). Входные характеристики антенной системы приведены на рисунке 4.28. Потери антенной системы показаны на рисунке 4.29.

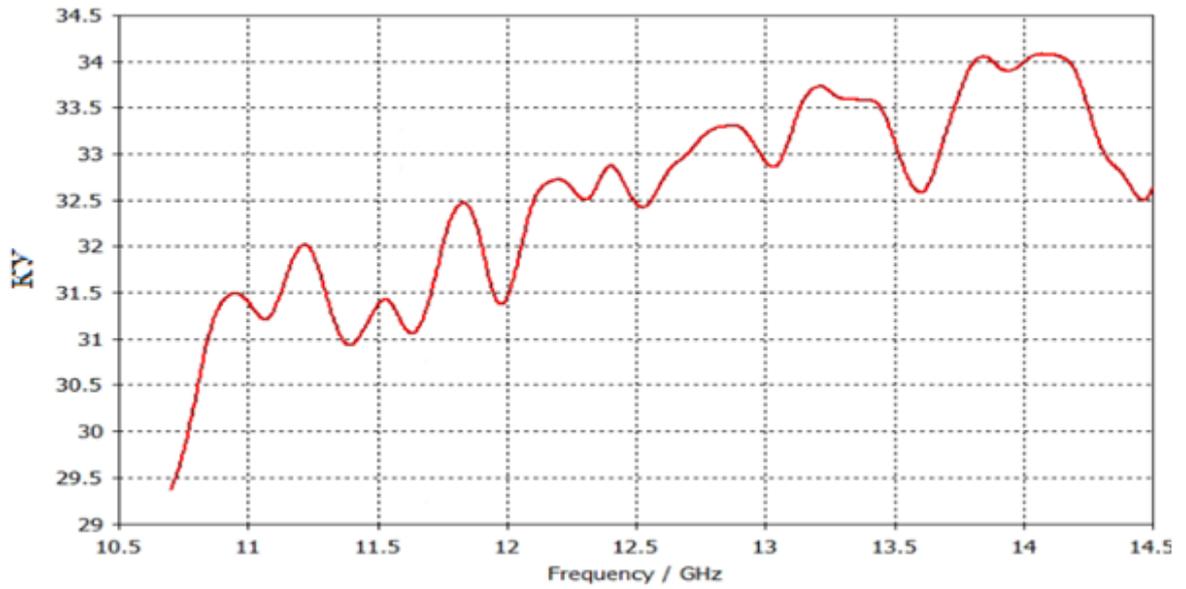
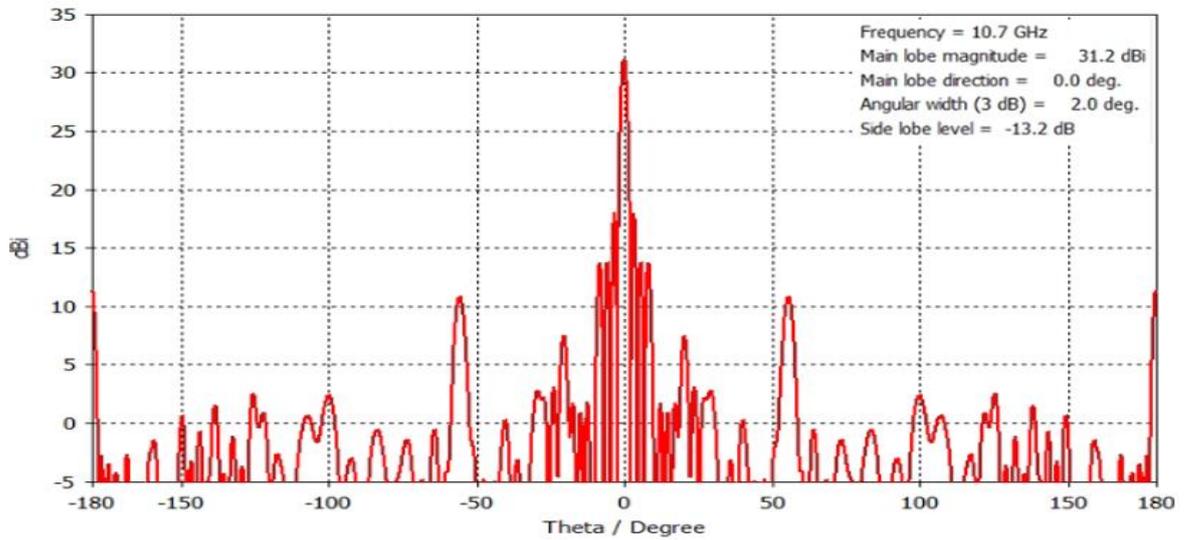
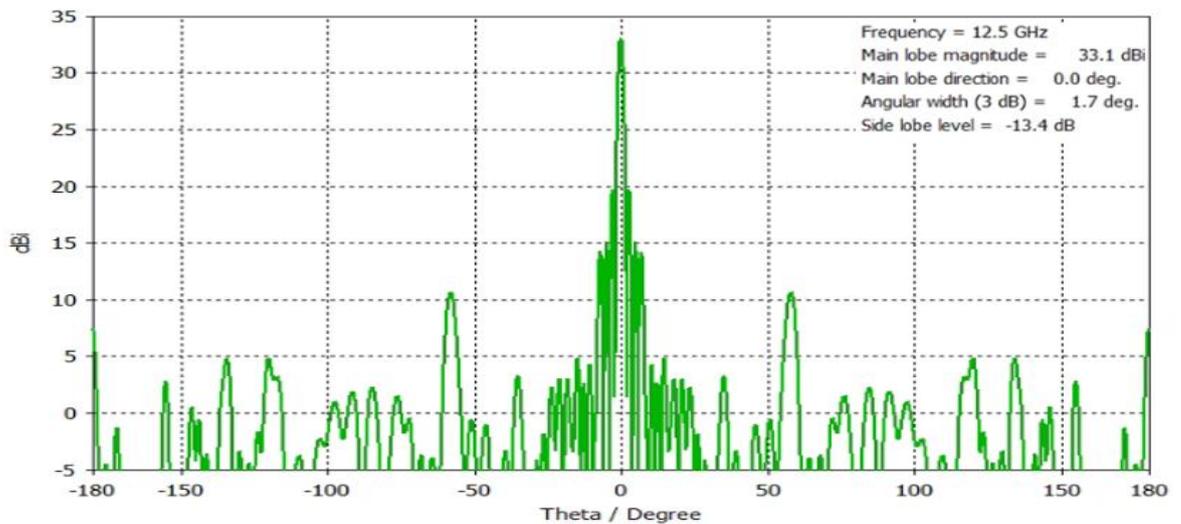


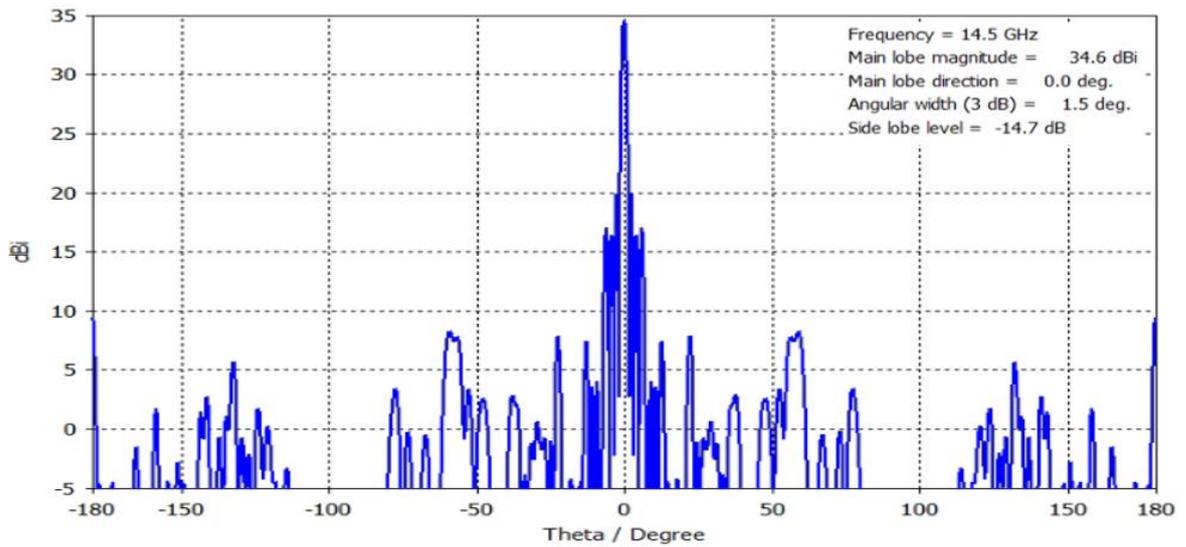
Рис. 4.26. Зависимость КУ от частоты



а) 10,7 ГГц



б) 12,7 ГГц



в) 14,5 ГГц

Рис. 4.27. ДН в азимутальной плоскости однородной нерегулярной линзы

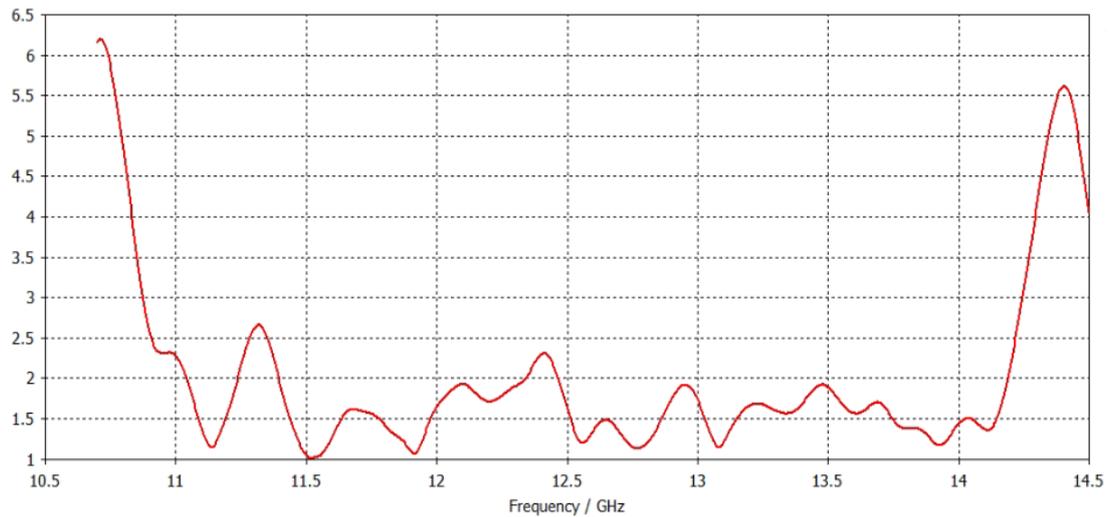


Рис. 4.28. Зависимость КСВН от частоты

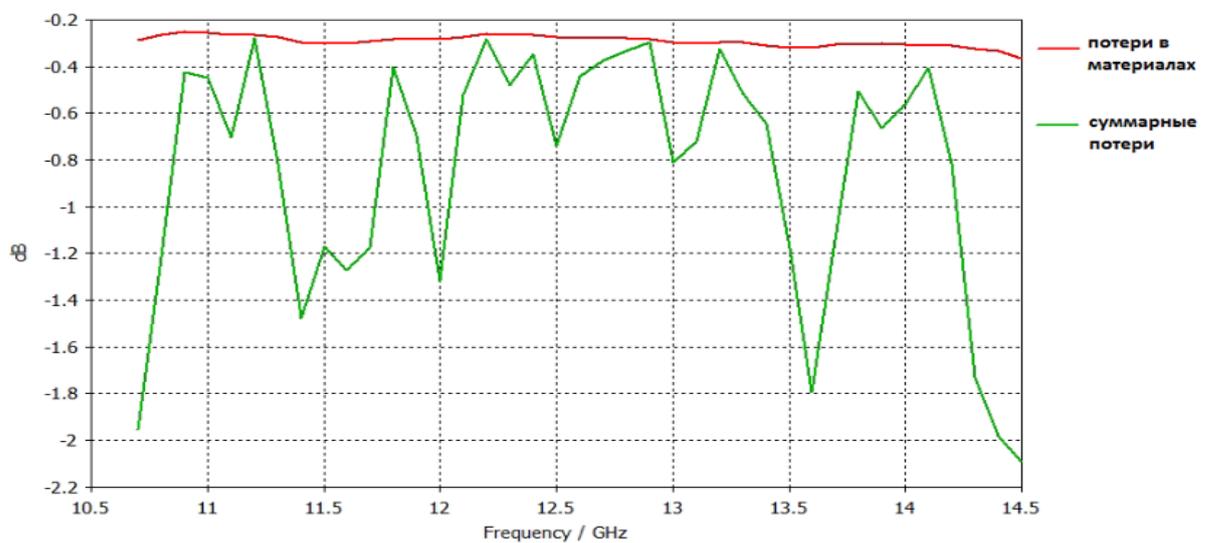


Рис. 4.29. Потери в антенной системе

Анализ полученных результатов показал, что:

- КУ возрастает с ростом частоты, имея максимальное значение 34.1 дБи, при этом в частотной зависимости КУ наблюдаются локальные минимумы и максимумы;
- КИП достигает 0,82.
- максимум УБЛ в азимутальной плоскости -12,5 дБ, минимум УБЛ составляет -14.7 дБ;
- рабочая полоса антенной системы 10,7-14,2 ГГц;
- КСВН меньше 3 диапазоне 10,7-14,2 ГГц, при этом в частотной зависимости КСВН наблюдаются локальные минимумы и максимумы;
- потери в материалах менее 0,5 дБ;
- потери с учетом согласования менее 2 дБ.

ДН в объеме на частоте 12,5 ГГц показана на рис. 4.30.

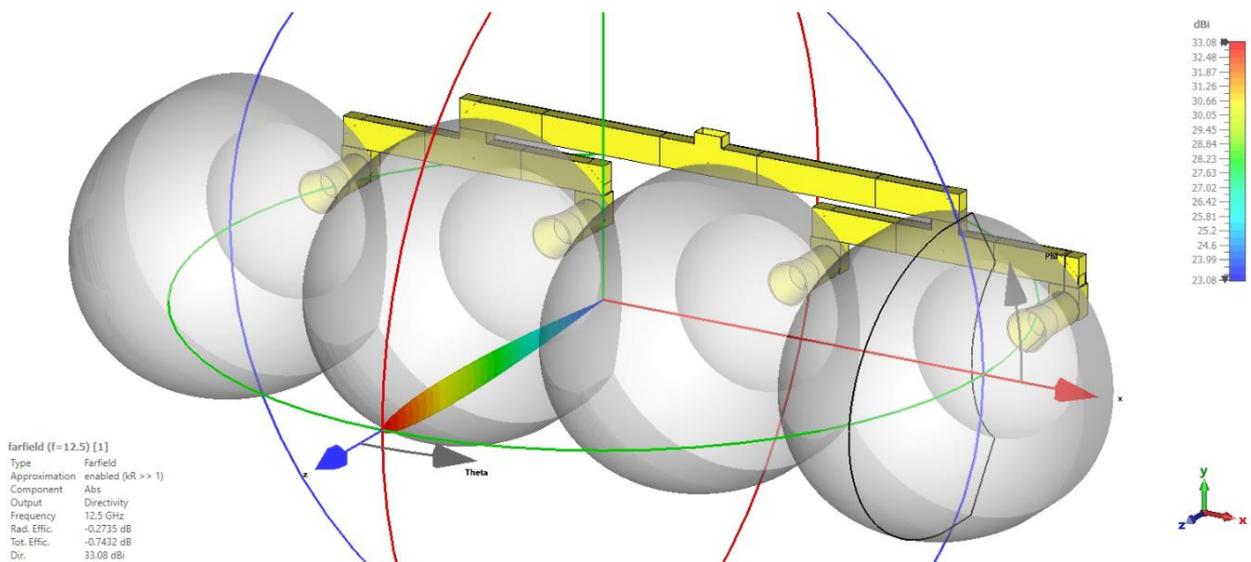


Рис. 4.30. ДН в объеме на частоте 12,5 ГГц однородной нерегулярной линзы

Таким образом, в настоящем подразделе разработана антенная система с механическим управлением линейной поляризацией на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика. Использование однородного диэлектрика позволило значительно снизить стоимость производства нерегулярной линзы, однако существенно увеличило ее массу. Использование линзовых антенн с

облучаемой сферической и теневой эллиптической стороной из однородного диэлектрика, обладающих высокими значениями КИП, позволило получить КНД, близкий к предельно достижимому при заданных размерах линзы. Типовое значение УБЛ в азимутальной плоскости близко в величине -13,2 дБ. Суммарные потери менее 2 дБ. Из-за нежелательных отражений от поверхности линзы ухудшается согласование антенной системы.

4.3.4. Результаты измерений основных электродинамических характеристик антенной системы на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика

В данном подразделе приведены результаты измерений КУ макетов антенных систем, изготовленных и измеренных в научно-производственном предприятии «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж).

Исходя из максимизации КНД антенной системы и минимизации стоимости производства (массогабаритные ограничения не являются первостепенными), макет АР выполнен на основе нерегулярной линзы, описанной в подразделе 4.3.3, состоящей линзовых антенн из однородного полистирола ($\epsilon_r = 2,55$, $\text{tg}(\delta) = 0,0007$) с теневой стороной в виде эллипсоида вращения и облучаемой сферической стороной.

На рисунке 4.31 внешний вид макета одиночной линзы из однородного диэлектрика, а на рисунке 4.32 приведена измеренная зависимость КУ от частоты.



а) общий вид



б) вид со стороны облучателя

Рис. 4.31. Внешний вид макета одиночной линзы

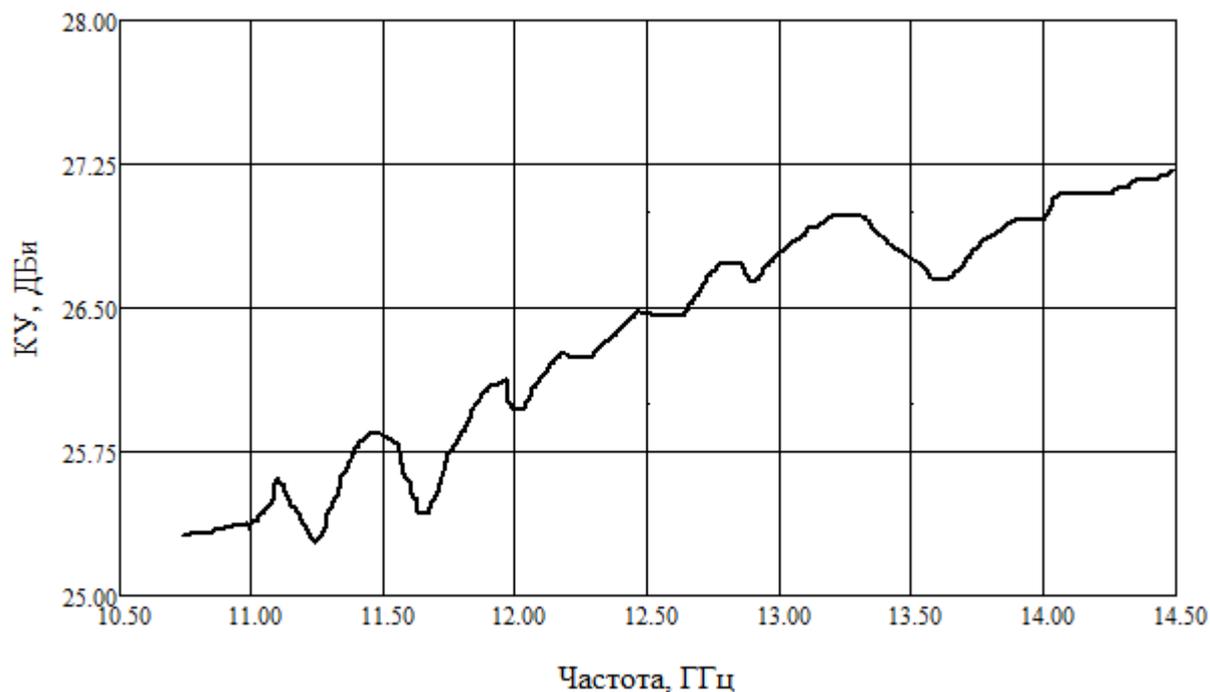


Рис. 4.32. Результаты измерений КУ одиночной линзы

Из анализа полученной зависимости следует, что КУ увеличивается с ростом частоты, имея максимальное значение 27.2 дБн.

На рисунке 4.33 показан внешний вид макета нерегулярной линзы, а на рисунке 4.34 приведена измеренная зависимость КУ от частоты.



а) общий вид



б) вид со стороны облучателя

Рис. 4.33. Внешний вид макета нерегулярной линзы

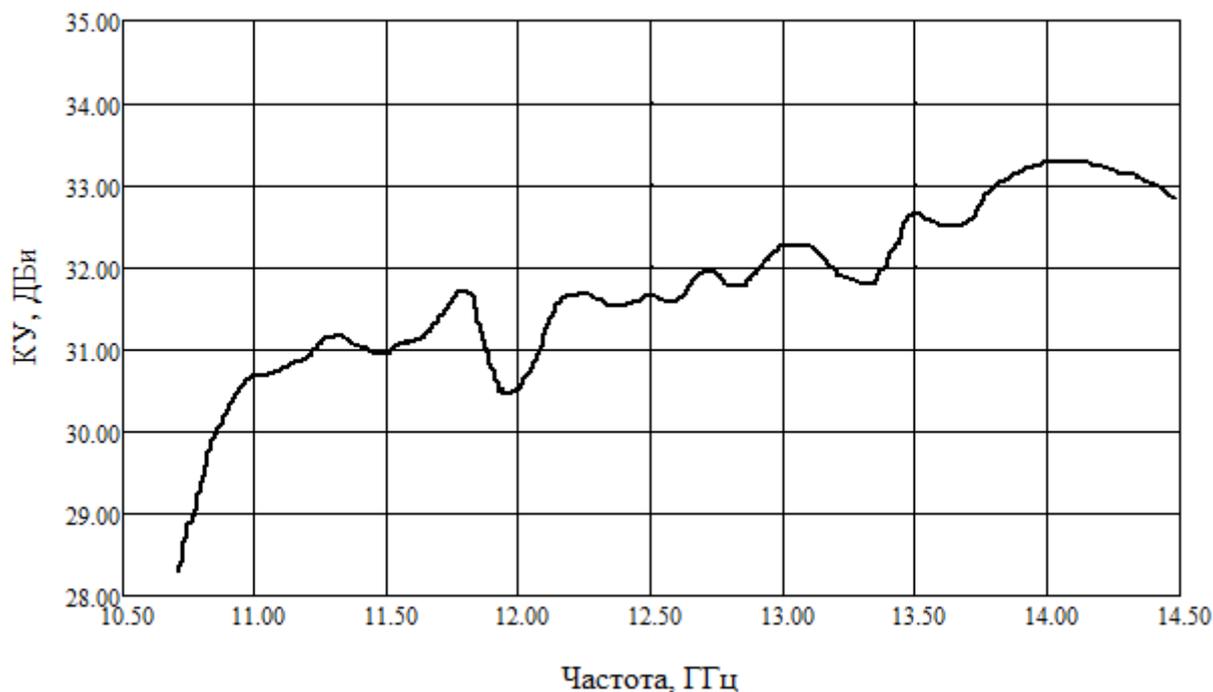


Рис. 4.34. Результаты измерений КУ нерегулярной линзы

Из анализа полученной зависимости и рисунка 4.26 (расчетная частотная зависимость КУ) следует, результаты измерения подтвердили достоверность расчетов.

4.4. Выводы по четвертой главе

Подводя итоги исследований, проведенных в четвертой главе диссертации, перечислим полученные результаты.

1. Разработана методика, позволяющая снизить УБЛ в АР, состоящих из электрически больших линзовых излучателей. Ее суть заключается в использовании усеченных линзовых антенн, объединенных в один массив и расположенных на одной оси, перпендикулярной оси симметрии каждой линзы (нерегулярная линза), для реализации распределения поля в раскрыве антенной системы ближнего синфазному равноамплитудному. Поэтому антенные системы, созданные на основе нерегулярной линзы, характеризуются значениями КНД, близкими к

предельно достижимым при заданных размерах линзы, и УБЛ, сопоставимым с величиной -13,2 дБ.

2. Разработана и исследована антенная система с двумя ортогональными поляризациями на основе нерегулярной линзы, состоящей из 4 однородных сферических линз диаметром 200 мм и периодом расположения 170 мм. Максимум КНД составляет 33,1 дБи. КИП достигает 0,57. УБЛ сопоставим с величиной -13,2 дБ. Использование однородного диэлектрика существенно увеличило массу нерегулярной линзы до 14,9 кг.

3. Разработана антенная система с двумя ортогональными поляризациями на основе нерегулярной линзы, состоящей из 4 сферических линз Люнеберга на основе диэлектрика с частичным воздушным заполнением. Такая конструкция нерегулярной линзы позволяет реализовать на ее основе антенные системы с двумя ортогональными поляризациями (линейная горизонтальная, вертикальная или $\pm 45^\circ$, левая или правая круговая). Использование линз Люнеберга, обладающих высокими направленными свойствами, позволило: повысить КНД на 1-2 дБ, увеличить КИП до 0,73-0,8, значительно снизить массу (более, чем в 2 раза), по сравнению с нерегулярной однородной линзой. При этом существенно усложнилась конструкция и возросла стоимость нерегулярной линзы.

4. Разработан ДОТ с механическим управлением линейной поляризации на основе 6 дБ волноводного делителя (стандартный волновод типа WR-75). Рабочая полоса 10,7-14,2 ГГц. Период расположения облучателей 170 мм. В качестве облучателей используются конические рупорные антенны, возбуждаемые щелевой антенной Вивальди. Механическое управление линейной поляризацией достигается за счет использования коаксиально-волноводного перехода (отверстие в широкой стенке волновода), запитывающего рупорный излучатель.

5. Разработана антенная система с механическим управлением линейной поляризации на основе нерегулярной линзы, состоящей из 4 усеченных планарных печатных линзовых антенн диаметром 200 мм и

периодом расположения 170 мм. Рабочая полоса антенной системы 12-13 ГГц. Максимальное значение КУ 30,7 дБи. КИП достигает 0,54. УБЛ в азимутальной плоскости не превышает -12,6 дБ. Суммарные потери в рабочем диапазоне менее 1 дБ. Благодаря печатному тонкому профилю, нерегулярная линза обладает небольшой массой, а созданная на ее основе антенная система удобна для размещения на борту транспортных средств или для использования в мобильных терминалах спутниковой связи.

6. Разработана антенная система с механическим управлением линейной поляризации на основе нерегулярной линзы, состоящей из однородных линзовых антенн с облучаемой сферической и теневой эллиптической, обладающих высокими значениями КИП. Использование таких линзовых антенн позволило получить КНД, близкий к предельно достижимому при заданных размерах линзы (КИП достигает 0,82), а также существенно снизить стоимость изготовления линзы. УБЛ в азимутальной плоскости близок к величине -13,2 дБ. Суммарные потери с учетом согласования менее 2 дБ.

7. Изготовлен макет одиночной линзы из однородного диэлектрика с облучаемой сферической и теневой эллиптической стороной, а также макет антенной системы на основе нерегулярной линзы. Проведены натурные измерения электродинамических характеристик макетов. Результаты измерений подтвердили достоверность расчетов.

Заключение

В рамках диссертационного исследования разработаны методологии проектирования искусственных диэлектриков и линзовых МЛА, а также проведены исследования основных электродинамических характеристик линзовых антенн.

Основные научно-технические результаты диссертации:

1. Проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития теории, техники и технологии производства линзовых МЛА. Проанализированы различные виды линзовых антенн: Проведен анализ различных способов проектирования, изготовления и технической реализации линзовых антенн с использованием: Рассмотрены имеющиеся достоинства и недостатки каждого из способов проектирования, изготовления и технической реализации.

2. Разработаны цилиндрические метаматериальные линзовые антенны для систем спутниковой связи на основе параллельных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала, обладающего дисперсией и анизотропией.

3. Исследовано влияние дисперсии и анизотропии метаматериалов на электродинамические характеристики цилиндрических метаматериальных линзовых антенн: однородная линза (фиксированный размер метаматериала), линзы Люнеберга с разным фокусным расстоянием.

4. Разработаны методики, позволяющие уменьшить анизотропию в печатных метаматериалах, а также в периодических структурах на основе отверстий в диэлектрике. На основе разработанных методик, синтезированы и исследованы: полусферическая метаматериальная линза из печатных плат, сферическая линза Люнеберга на основе перфорированных диэлектрических дисков.

5. Разработана и исследована двухкоординатная МЛА на основе печатной линзы для систем сотовой связи диапазона 5-G, обеспечивающая

развязку по поляризации между облучателем и линзой – антенная система имеет круговую поляризацию, а облучатели линзы имеют линейную поляризацию.

6. Исследованы направленные и частотные характеристики в широкой полосе трехмерно-трансформированной линзы Люнеберга, имеющей плоский профиль с вынесенным фокусом. При этом рассматривается общий случай – модель линзы выполнена в виде двадцати вложенных друг в друга тел вращения. При этом учтены те ограничения приближения, которые необходимы при технической реализации.

7. Разработана методика, позволяющая снизить УБЛ в АР из электрически больших линзовых элементов благодаря использованию новой конструкции линзовой антенны – нерегулярной линзе. Разработаны и исследованы антенные системы на основе нерегулярной линзы различных конструкций. Достоверность разработанной методики подтверждена как результатами численного электромагнитного моделирования, так и натурными измерениями электродинамических характеристик антенн.

Список сокращений и условных обозначений

АР – антенные решетки

АФАР – активные фазированные антенные решетки

ДН – диаграмма направленности

ДОТ – диаграммообразующий тракт

КИП – коэффициент использования поверхности

КНД – коэффициент направленного действия

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

КУ – коэффициент усиления

МЛА – многолучевые антенны МЛА

ТО – Трансформационная оптика

УБЛ – уровень боковых лепестков

ФАР – фазированные антенные решетки

ЧПУ-станок – станок с числовым программным управлением

Список литературы

1. Шишлов А.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев, В.Р. Анпилогов, В.В. Денисенко // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf>.
2. Зелкин Е.Г. Линзовые антенны / Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. – М.: Советское радио. 1974. – 280 с.
3. Многолучевая линзовая антенна: пат. 2099833 Рос. Федерация: МПК H01Q 15/02, H01Q 3/08, H01Q 5/00, H01Q 25/00 / П.Н. Корженков, Ю.Л. Пяйт, А.С. Смагин, А.Л. Эпштейн; патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью «Конкур». Дата подачи заявки: 28.01.1996. Опубликовано: 12.20.1997.
4. Многолучевая линзовая антенна: пат. 2120162 Рос. Федерация: МПК H01Q 15/08, H01Q 3/08 / Б.С. Хмелевский, Ю.Л. Пяйт, М.А. Эпштейн; патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью «Конкур». Дата подачи заявки: 12.09.1997. Опубликовано: 10.10.1998.
5. Бобков Н.И. Исследование многолучевой линзовой антенны с частотно-независимыми характеристиками излучения / Н.И. Бобков, С.С. Ивакина, В.В. Проживальский // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – №3. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/1/text.pdf>.
6. Hua C.Z. Millimeter-wave homogenous cylindrical lens antenna for multiplefan-beam scanning / C.Z. Hua, X.D. Wu, N. Yang, W. Wua // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2012. – Vol. 26(14-15). – P. 1922-1929.
7. Shad S. Waveguide-Fed Lens Based Beam-Steering Antenna For 5G Wireless Communications / S. Shad, S. Kausar, H. Mehrpouyan // 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. – 2019.

8. Lens based antenna for super high capacity wireless communications system: patent 9666943 United States: IPC H01Q5/30, H01Q3/46, H01Q1/241, H01Q1/36, H01Q15/02, H01Q21/205, H01Q25/00, H04W16/28 / S. Matitsine, L. Matytsine, A. DeMarco; assignee Matsing Inc. Date of patent 30.05.2017.

9. Low profile hemispherical lens antenna array on a ground plane: patent 5781163 United States: IPC H01Q15/08, H01Q19/062, H01Q19/104, H01Q21/08 / L.J. Ricardi, F.W. Cipolla; assignee L3 Technologies Inc. Date of patent 14.07.1998.

10. Harrison D.M. A hemispherical lens antenna for multi-satellite reception / D.M. Harrison, M. Fujimoto, G. Tabor // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest. – 1992.

11. Николаев В.И. Многолучевая антенная система УКВ диапазона волн на основе усеченного конуса, насыпанного из гранитного щебня / В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Федоров // Вестник ВГТУ. – 2021. – Т.17. – № 6. – С. 100-106.

12. Kock W.E. Metal-Lens Antennas / W.E. Kock // Proceedings of the IRE. – 1946. Vol. 34(11). – P.828-836

13. Kock W.E. Metallic delay lenses/ W.E. Kock // The Bell System Technical Journal. –1948. – №1(27). – P. 58-82.

14. Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – М.: Советское радио, 1974. – 536 с.

15. Hristov H.D. Millimeter-wave Fresnel-zone plate lens and antenna / H.D. Hristov, M.H.A.J. Herben // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1995. Vol. 43(12). – P. 2779-2785.

16. Black D.N. Millimeter-Wave Characteristics of Phase-Correcting Fresnel Zone Plates / D.N. Black, J.C. Wiltse // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1987. – Vol. 35(12). – P. 1122-1129.

17. Pourahmadazar J. Towards millimeter-wavelength: Transmission-mode fresnelzone plate lens antennas using plastic material porosity control in

homogeneous medium / J. Pourahmadazar, A.T. Denidni // *Scientific Reports*. – 2018. Vol. 8.

18. Rodríguez J.M. Fresnel zone plate and ordinary lens antennas: Comparative study at microwave and terahertz frequencies / J.M. Rodríguez, H. D. Hristov, W.Grote // 2011 41st European Microwave Conference. – 2011.

19. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот / А.З. Фрадин. – М.: Советское радио, 1957. – 648с.

20. Авдюшин А.С. Использование метода виртуальных лучей для анализа сверхширокополосной многолучевой антенной решетки с апланатической линзой / А.С. Авдюшин, А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 9. – № 6-1. – С. 56-58.

21. Калошин В.А. Синтез и анализ диэлектрических бифокальных линз / В.А. Калошин, Х. Д. Нгием // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. – 2018. – №8. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/17/text.pdf>.

22. Venetskiy A.S. On Aberrations of Eikonal in Planar Lens Antennas / A.S. Venetskiy, V.A. Kaloshin // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2017. – Vol. 62(6). – P. 558-564.

23. Мальцев А.А. Сканирующая тороидально-бифокальная линзовая антенная система диапазона 57-64 ГГц / А.А. Мальцев, В.М. Селезнев, А.С. Рутьков, О.В. Болховская // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 36-47.

24. Сканирующая линзовая антенна: пат. 2660385 Рос. Федерация: МПК H01Q 3/24 / О.В. Болховская, В.М. Селезнев, В.Д. Голубь; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Радио Модуль НН». Дата подачи заявки: 24.07.2017. Опубликовано: 06.07.2018.

25. La T.V. Design of medium-size dielectric bifocal lenses for wide-angle beam scanning antennas / T.V. La, N.T. Nguyen, M. Casaletti, R. Sauleau // 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – 2012.

26. Ruze J. Wide-Angle Metal-Plate Optics / J. Ruze // Proceedings of the IRE. – 1950. Vol. 38(1). P.53-59.
27. Dion A.R. A variable-coverage satellite antenna system / A.R. Dion, L.J. Ricardi // Proceedings of the IEEE. – 1971. Vol. 59(2). P. 252-262.
28. Rotman W. Wide-angle microwave lens for line source applications / W. Rotman, R.F. Turner // IEEE Transactions on Antenna and Propagation. – 1963. – Vol. 11(6). – P. 623-632.
29. Hansen R.C. Design trades for Rotman lenses / R.C. Hansen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1991. Vol. 39(4). P.464-472.
30. Vashist S. A review on the development of Rotman lens antenna / S. Vashist, M. Soni, P. Singhal // Chinese Journal of Engineering. – 2014. Vol. 2014. – P. 1-9.
31. Cheng Y.J. Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications / Y.J. Cheng, W. Hong, K. Wu, Z.Q. Kuai, C. Yu, J.X. Chen, J.Y. Zhou, H.J. Tang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2008. Vol. 56(8). P. 2504-2513.
32. Рыжиков А.Г. Исследование характеристик антенной решетки на основе линзы Ротмана и антенн с эллиптическими плечами / А.Г. Рыжиков, С.А. Слинчук, С.М. Фёдоров, В.И. Чугуевский // Вестник ВГТУ. – 2013. Т. 9. №2. С. 49-52.
33. Chou H.-T. Tri-Focal Configuration of Three-Dimensional Metallic Waveguide-Array Lens Antennas of Rotman Lens Concept for Multi-Beam Applications / H.-T. Chou, Z.-C. Tsai, S. Panigrahi // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 144524-144535.
34. Кюн Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн. – Л.: Судостроение, 1967. – 518 с.
35. Пастернак Ю.Г. Анализ современных способов и средств технической реализации линзы Люнеберга / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Антенны. – 2022. – №2. – С. 53-62.

36. Коротков А.Н. Влияние способа дискретизации цилиндрической линзы Люнеберга на ее характеристики излучения / А.Н. Коротков, С.Н. Шабунин // Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления. – 2015. – С. 20-26.

37. Панченко Б.А. Влияние уровня стратификации линзы Люнеберга на ее антенные характеристики / Б.А. Панченко, Д.В. Денисов, В.В. Мохова, Н.В. Панов // Известия высших учебных заведений России, Радиоэлектроника. – 2014. – №1. – С. 3-6.

38. Fuchs B. Design optimization of multishell Luneburg Lenses / B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, S. Rondineau, M. Himdi // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – № 2 (55). – P. 283-289.

39. Peeler G.D.M. Microwave stepped-index Luneberg lenses / G.D.M. Peeler, H. Coleman // IRE Transactions on Antennas and Propagation. – 1958. – № 2 (6). – Pp.202-207.

40. Foam Based Luneburg Lens Antenna at 60 GHz / J. Bor, O. Lafond, H. Merlet, P. Le Bars, M. Himdi // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2014. – Vol. 44. – P. 1-7.

41. Диэлектрическая полимерная пена и линза для радиоволн с ее использованием: пат. 2263124 Рос. Федерация: МПК С08J9/04, С08L101/12, С08K13/04, H01B3/00, H01Q15/02 / АКИ Минору, МОНДЕ Хироюки, ТАБУТИ Акира, ТАТИ Йосифуми, КАВАКАМИ Сиоуго, КУРОДА Масатоси, КИСИМОТО Тецуо, КИМУРА Коуити; патентообладатель ОЦУКА КЕМИКАЛ КО., ЛТД. (JP), СУМИТОМО ЭЛЕКТРИК ИНДАСТРИЗ, ЛТД. (JP). Дата подачи заявки: 25.07.2001 г. Опубликовано: 27.10.2005 г.

42. Peeler G.D.M. A two-dimensional microwave Luneberg lens / G.D.M. Peeler, D.F. Archer // Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation. – 1953. – №1(1). – P. 12-23.

43. Кузиков А.А. Исследование печатной цилиндрической линзы Люнеберга / А.А. Кузиков, Р.С. Орехов, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – №1. – С. 426-430.

44. Антенное устройство на основе линзы Люнеберга: пат. 174675 Рос. Федерация: МПК H01Q 15/02 / Д.С. Алиев, А.В. Иванов, Ю.Г. Пастернак; патентообладатель Алиев Дмитрий Сергеевич. Дата подачи заявки: 25.07.2017 г. Опубликовано: 27.10.2017 г.

45. Устройство для фокусировки типа «линза Люнеберга»: пат. 2485646 Рос. Федерация: МПК H01Q 15/02 / Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». Дата подачи заявки: 12.03.2012 г. Опубликовано: 20.06.2013 г.

46. Lens arrays configurations for improved signal performance: patent 20210167514 United States: IPC H01Q15/02 / S. Matitsine, L. Matytsine, A. DeMarco; assignee Matsing Inc. Date of patent 03.05.2021.

47. Spherical lens array based multi-beam antennae: patent 10326208 United States: IPC H01Q15/02 / S. Matitsine, L. Matytsine, A. DeMarco; assignee Matsing Inc. Date of patent 18.06.2019.

48. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн / Г.З. Айзенберг // – М.: Связьиздат. – 1957. – 698 с.

49. Микаэлян А.Л. Методы расчета диэлектрической и магнитной проницаемости искусственных сред / А.Л. Микаэлян // Радиотехника. – 1955. – Т. 10. – № 1. – С. 23-36.

50. Estrin G. The effective permeability of an array of thin conducting disks / G. Estrin // Journal of Applied Physics. – 1950. – Vol. 21. – P. 667-670.

51. Щелкунов С. Антенны / С. Щелкунов, Г. Фриис; пер. с англ. под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Советское радио. – 1955. – 604 с.

52. Cohn S.B. Analysis of the metal-strip delay structure for microwave lenses / S.B. Cohn // Journal of Applied Physics. – 1949. – Vol. 20. – P. 257-262.

53. Brown J. The design of metallic delay dielectrics / J. Brown // Proc. IEE-III Radio Commun. Eng. – 1950. – Vol. 97(45) – P. 45-48.

54. Вендик И.Б. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор) / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 1. – С. 3-28.

55. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты / В. Слюсар // Первая миля. – 2010. – №3-4. – С. 44-60.

56. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ / В.Г. Веселаго // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 92. – №7. – С. 517-526.

57. Веселаго В.Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления / В.Г. Веселаго // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – №7. – С. 790-794.

58. Веселаго В.Г. О формулировке принципа Ферма для света, распространяющегося в веществах с отрицательным преломлением // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – № 10. – С. 1215-1218.

59. Pendry J.B. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena / J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1999. Vol. 47(11). P. 2075-2084.

60. Smith D.R. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity / D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz // Physical Review Letters. – 2000. Vol. 84(18). P. 4184-4187.

61. Left handed composite media: patent 6791432 United States: IPC H01Q3/44, H01Q1/364, H01Q15/0086, Y10T428/12007 / D. Smith, S. Schultz, N. Kroll, R.A. Shelby; assignee University of California. Date of patent 14.09.2004.

62. Benedikt A. Munk Frequency Selective Surfaces: Theory and Design / A. Munk Benedikt. – Wiley, New York. – 2000. – 440 p.

63. Пастернак Ю.Г. Анализ перспективных подходов к созданию электрически малых антенн с эффективностью, приближающейся к определяемой в соответствии с критерием Чу-Харрингтона-Ли /

Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров, М.А. Сиваш // Вестник ВГТУ. – 2019. – Т. 15. – №6. – С. 94-102.

64. Werner D. Broadband Metamaterials in Electromagnetics: Technology and Applications / D. Werner. – Pan Stanford Publishing. – 2016. – 382 p.

65. Luneberg lens and method of constructing same: patent 5677796 United States: IPC H01Q15/08, G02B3/0087, B33Y80/00 / К.А. Zimmerman, D.L. Runyon; assignee EMS Technologies Canada Ltd. Date of Patent: 14.10.1997.

66. Sato K. A Plate Luneberg Lens with the Permittivity Distribution Controlled by Hole Density / К. Sato, Н. Ujiie // Electronics and Communications in Japan, Part 1. – 2002. – Vol. 85(9). P. 1-12.

67. Антипов С.А. Экспериментальное исследование сверхширокополосной антенны, построенной на основе модификации плоской линзы Люнеберга / С.А. Антипов, А.В. Ашихмин, В.В. Негроров, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 113-118.

68. Rondineau S. A sliced spherical Luneburg lens/ S. Rondineau, M. Himdi M., J. Sorieux // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2003. – Vol. 2. – P. 163-166.

69. Changsheng D. Permittivity of composites used for Luneburg lens antennas by drilling holes based on 3-D printing technique / D. Changsheng, C. Ziqing, L. Yong, W. Haidong, J. Chao, Y. Shiwen // Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology. – 2017. – Vo1. 15(4). – P. 646-651.

70. Liang M. A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping / M. Liang, W.R. Ng, K. Chang, K. Gbele, M.E. Gehm, H. Xin // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62(4). – P. 1799-1807.

71. Kubach A. 3D printed Luneburg lens for flexible beam steering at millimeter wave frequencies / A. Kubach, A. Shoykhetbrod, R. Herschel // 2017 47th European Microwave Conference (EuMC). – 2017. – P. 787-790.

72. Larimore Z. Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-Filling Curves and Fused Filament Fabrication / Z. Larimore, S. Jensen, A. Good, A. Lu, J. Suarez, M. Mirotznik // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(6). – P. 2818-2827.

73. Xin H. 3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques / H. Xin, M. Liang // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105(4). – P. 737-755.

74. Авдюшин А.С. Исследование плоской линзы Лüneберга с радиальными диэлектрическими лепестками / А.С. Авдюшин, К.О. Волков, К.А. Разинкин, С.М. Фёдоров // Вестник ВГТУ. – 2014. – Т. 10. – №5-1. – С. 23-25.

75. Sayanskiy A. Broadband 3-D Luneburg Lenses Based on Metamaterials of Radially Diverging Dielectric Rods / A. Sayanskiy, S. Glybovski, V.P. Akimov, D. Filonov, P. Belov, I. Meshkovskiy // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Vol. 16. – P. 1520-1523.

76. Pfeiffer C. A Printed, Broadband Luneburg Lens Antenna / C. Pfeiffer, A. Grbic // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58(9). – P. 3055-3059.

77. Cheng Q. Broadband planar Luneburg lens based on complementary metamaterials / Q. Cheng Q., H.F. Ma, T.J. Cui // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 95(18).

78. Dhouibi A. Metamaterial-based 2D multi-beam broadband Luneburg lens antenna / A. Dhouibi, S.N. Burokur, A. Lustrac // 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). – 2014.

79. Deepthi K.V.B.L. An Investigation of the Substrate-Integrated Luneburg Lens Antenna with gradient Index and Meta-material Structures / K.V.B.L. Deepthi, K.J. Sankar // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11(8). – P. 5762-5766.

80. Cheng G. Planar Luneburg Lens Based on the High Impedance Surface for Effective Ku-Band Wave Focusing / G. Cheng, Y. Wu, J.X. Yin, N. Zhao, T. Qiang, X. Lv // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 16942-16947.

81. Chen H. Modified Luneburg Lens Based on Metamaterials / H. Chen, Q. Cheng, A. Huang, J. Dai, H. Lu // International Journal of Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 2015. – 6 p.

82. URL: <https://matsing.com> (дата обращения: 05.02.2021).

83. Artificial dielectric material and method of manufacturing the same: patent 8518537 United States: IPC C08J9/0085 / S. Matitsine; assignee Matsing Pte Ltd. Date of patent 27.08.2013.

84. Кильдишев А.В. Трансформационная оптика и метаматериалы / А.В. Кильдишев, В.М. Шалаев // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181. – №1. – С. 59-70.

85. Leonhardt U. Optical conformal mapping / U. Leonhardt // Science. – 2006. – Vol. 312(5781). – P. 1777-1780.

86. Pendry J.B. Controlling Electromagnetic Fields / J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith // Science. 2006. Vol. 312. №5781. Pp.1780-1782.

87. Pendry J.B. Calculation of material properties and ray tracing in transformation media / J.B. Pendry, D. Schurig, D.R. Smith // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(21). – P. 9794-9804.

88. Hunt J. Transformation Optics Compressed Rotman Lens Implemented with Complementary Metamaterials / J. Hunt, N. Kundtz, B. Sun, D.R. Smith // SPIE 8021, Radar Sensor Technology XV. – 2011. – Vol. 8021. – P. 1-7.

89. Foster R. Beam-Steering Performance of Flat Luneburg Lens at 60 GHz for Future Wireless Communications / R. Foster, D. Nagarkoti, J. Gao, B. Vial, F. Nicholls, C. Spooner, S. Haq, Y. Hao // International Journal of Antennas and Propagation. – 2017. – Vol.6. – P. 1-8.

90. Bai W. A Compact, Wide Field-of-View Gradient-Index Lens Antenna for Millimeter-Wave MIMO on Mobile Devices / W. Bai, J. Chisum // 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). – 2017.

91. Mateo-Segura C. Flat Luneburg lens via transformation optics for directive antenna applications / C. C. Mateo-Segura, A. Dyke, H. Dyke, S. Haq, Y. Hao // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62(4). – P. 1945-1953.
92. Su Y. A Flat Dual-Polarized Transformation-Optics Beam scanning Luneburg Lens Antenna Using PCB-Stacked Gradient Index Metamaterials / Y. Su, Z.N. Chen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66(10). – P. 5088-5097.
93. Demetriadou A. Slim Luneburg lens for antenna Applications / A. Demetriadou, Y. Hao // Optics Express. – 2011. – Vol. 19(21). – P. 19925-19934.
94. Schurig D. An aberration-free lens with zero f-number / D. Schurig // New Journal of Physics. – 2008. – Vol. 10. – P. 115034.
95. Kundtz N. Extreme-angle broadband metamaterial lens / N. Kundtz, D.R. Smith // Nature Materials. – 2010. – Vol. 9(2). – P. 129-132.
96. Hunt J. Broadband wide angle lens implemented with dielectric metamaterials / J. Hunt, N. Kundtz, N. Landy, V. Nguyen, T. Perram, A. Starr, D.R. Smith // Sensors. – 2011. – Vol. 11(8). – P. 7982-7091.
97. Gradient index lenses and methods with zero spherical aberration: patent WO/2011/044239 United States: IPC G02B3/0087 / D.R. Smith, N.B. Kundtz; assignee Duke University. Date of Patent: 19.05.2011.
98. Ma H.F. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens / H.F. Ma, T.J. Cui // Nature Communications. – 2010. – Vol. 1(8). – Article 124.
99. Li Y. Luneburg lens with extended flat focal surface for electronic scan applications / Y. Li, Q. Zhu // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(7). – P. 7201-7211.
100. Padilla P. Passive planar transmit-array microstrip lens for microwave purpose / P. Padilla, A. Muñoz-Acevedo, M. Sierra-Castañer // Microwave and Optical Technology Letters. – 2010. Vol. 52(4): – P. 940-947.

101. McGrath D. Planar three-dimensional constrained lenses / D. McGrath // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Vol. 34(1). – P. 46-50.

102. Planar three-dimensional constrained lens for wide-angle scanning: patent 4721966 United States: IPC H01Q3/14 / D.T. McGrath; assignee US Air Force. Date of Patent: 26.01.1988.

103. Slot coupled microstrip constrained lens: patent 4899164 United States: IPC H01Q19/06, H01Q21/0018 / D.T. McGrath; assignee US Air Force. Date of Patent: 06.02.1990.

104. Popovic D. Multibeam antennas with polarization and angle diversity / D. Popovic, Z. Popovic // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50(5). – P. 651-657.

105. Pous R. A frequency-selective surface using aperture-coupled microstrip patches / R. Pous, D.M. Pozar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1991. – Vol. 39(12). – P. 1763-1769.

106. Pozar D.M. Flat lens antenna concept using aperture coupled microstrip patches / D.M. Pozar // Electronics letters. – 1996. – Vol. 32(23). – P. 2109-2111.

107. Abbaspour-Tamijani A. A planar filter-lens array for millimeter-wave applications / A. Abbaspour-Tamijani, K. Sarabandi, G.M. Rebeiz // IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004. – 2004.

108. Abbaspour-Tamijani A. A new class of bandpass frequency selective structures / A. Abbaspour-Tamijani, B. Schoenlinner, K. Sarabandi, G.M. Rebeiz // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450). – 2003.

109. Abbaspour-Tamijani A. Antenna-filter-antenna arrays as a class of bandpass frequency-selective surfaces / A. Abbaspour-Tamijani, K. Sarabandi, G.M. Rebeiz // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – Vol. 52(8). – P: 1781-1789.

110. Kaouach H. Design and Characterization of Circularly Polarized Discrete Lens Antennas in 60 GHz Band / H. Kaouach // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2015. – Vol. 15. – P. 1200-1203.

111. Hum S.V. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review / S.V. Hum, J. Perruisseau-Carrier // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2014. – Vol. 62(1). – P. 183-198.

112. Исследование многолучевых линзовых антенн на основе параллельных печатных плат / М.П. Беляев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин // *Вестник ВГТУ*. – 2021. – Т. 17. – № 3. – С. 66-72.

113. Nicolson A.M. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques / A.M. Nicolson, G.F. Ross // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 1970. – Vol. 19(4). – P. 377-382.

114. Weir W.B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies / W.B. Weir // *Proceedings of the IEEE*. – 1974. – Vol. 62(1). – P. 33-36.

115. Rothwell E.J. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials / E.J. Rothwell, J.L. Frasca, S.M. Ellison, P. Chahal, R.O. Ouedraog // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2016. – Vol. 157. – P. 31-47.

116. Baker-Jarvis J.R. Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, and negative-Index Materials: NIST Technical Note 1536 / J.R. Baker-Jarvis, M.D. Janezic, B.F. Riddle, R.T. Johnk, C.L. Holloway, R.G. Geyer, C.A. Grosvenor. – Gaithersburg: NIST Technical Note 1536. 2005. – 152 p.

117. Akel K.A. Novel technique for measuring the complex dielectric constant and permeability / K.A. Akel // *2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*. – 2006.

118. Arslanagić S. A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization / S. Arslanagić, T.V. Hansen, N.A. Mortensen, A.H. Gregersen, O. Sigmund,

R.W. Ziolkowski, O. Breinbjerg // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2013. – Vol.55(2). – P. 91-106.

119.Szabó Z. A Unique Extraction of Metamaterial Parameters Based on Kramers-Kronig Relationship / Z. Szabó, G.H. Park, R. Hedge, E.P. Li // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2010. – Vol. 58(10). – P. 2646-2653.

120.Smith D.R. Determination of Effective Permittivity and Permeability of Meta-Materials from Reflection and Transmission Coefficients / D.R. Smith, S. Schultz, P. Markos, C.M. Soukoulis // *Physical Review B*. – 2002. – Vol. 65(19). P. 195104-19109.

121.Chen X. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials / X. Chen, T.M. Grzegorzczuk, B.-I.Wu, J. Pacheco, J.A. Kong // *Physical Review E*. – 2004. Vol. 70(1). – P. 016608.

122.Smith D.R. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous Metamaterials / D.R. Smith, D.C. Vier, Th. Koschny, C.M. Soukoulis // *Physical Review. E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2005. – Vol. 71(3). – P. 195104.

123.Szabó Z. Closed Form Kramers–Kronig Relations to Extract the Refractive Index of Metamaterials / Z. Szabó // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2017. – Vol. 65(4). – P. 1150-1159.

124.Aladadi Y.T. Extraction of metamaterial constitutive parameters based on data-driven discontinuity detection / Y.T. Aladadi, M.A. Alkanhal // *Optical Materials Express*. – 2019. – Vol. 9(9). – P. 3765-3780.

125.Kim S. An Approximate Approach to Determining the Permittivity and Permeability near $\lambda/2$ Resonances // S. Kim, J. Baker-Jarvis. *Progress In Electromagnetics Research B*. – 2014. – Vol. 58. – P. 95-10.

126.Qi J. Compensation of Fabry-Pérot Resonances in Homogenization of Dielectric Composites / J. Qi, H. Kettunen, H. Wallén, A. Sihvola // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2010. – Vol. 9. – P. 1057-1060.

127. Пастернак Ю.Г. Синтез и анализ одной цилиндрической линзы, построенной на основе параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Вестник ВГТУ. – 2020. – Т.16. – № 4. – С. 83-90.

128. Choi M. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index / M. Choi, S.H. Lee, Y. Kim, B.S. Kang, J. Shin, M.H. Kwak, K.Y. Kang, Y.H. Lee, N. Park, B. Min // Nature. – 2011. – Vol.470(7334). – P. 369-373.

129. Weiland T.A. Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields / A.T. Weiland // Electronics and Communication. 1977. – Vol. 31(3). – P. 116- 120.

130. Clemens M. Discrete electromagnetism with the finite integration technique / M. Clemens, T. Weiland // Progress In Electromagnetics Research, PIER 32. 2001. – P. 65-87.

131. Горбачев А.П. Проектирование печатных фазированных антенных решеток в САПР «CST Microwave Studio»: учебное пособие / А.П. Горбачев, Е. А. Ермаков – Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2008. – 88 с.

132. Макаров О.Ю. Влияние дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Люнеберга / О.Ю. Макаров, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, Е.А. Рогозин, С.М. Фёдоров // Радиотехника. – 2020. – Т. 84. – № 6 (12). – С. 42-48.

133. Пастернак Ю.Г. Влияние дисперсии метаматериала на характеристики линзы Люнеберга / Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж. – Том 4. – С. 356-362.

134. Пастернак Ю.Г. Анализ влияния дисперсии метаматериалов в цилиндрической линзе Люнеберга с вынесенным фокусом / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2020. – Т. 23. – №4. С. 48-55.

135. Пастернак Ю.Г. Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, С.М. Федоров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24. – №1. – С. 32-38.

136. Пастернак Ю.Г. Эффективные параметры метаматериала имеющий форму иерусалимского креста с впаянным в центре металлическим стержнем / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, С.М. Федоров // Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», г. Ижевск, 2022. – С. 352-357

137. Пастернак Ю.Г. Полусферическая метаматериальная линза из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, С.М. Федоров // Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», г. Ижевск, 2022. – С. 345-351

138. Алиев Д.С. Моделирование многолучевой антенной решетки 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.

139. Быков К.А. Сферическая линза Люнеберга на основе печатных плат с электрически малыми рассеивателями / К.А. Быков, Л.Н. Коротков, Пастернак Ю.Г., Рогозин Р.Е., Федоров С.М. // Вестник ВГТУ. – 2019. – Т.15. – № 1. – С. 78-83.

140. Пастернак Ю.Г. Двухкоординатная многолучевая антенная система на основе печатной линзы / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, С.М. Федоров // Сборник тезисов XVIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» ФиТПВП-2020, г. Самара. – С. 100-101.

141. Фуско В. СВЧ цепи: Анализ и автоматизированное проектирование / В. Фуско; пер. с англ. – М: Радио и связь. 1990. – 288 с.

142. James J.R. Handbook of Microstrip Antennas / J.R. James.– London: Peter Peregrinus Ltd. 1989. – 1312 p.

143. Марков Г.Т. Антенны. / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М. Энергия. 1975. – 528 с.

144. Rappaport C.M. Multifocal bootlace lens design concepts: a review / C.M. Rappaport, A.I. Zaghoul // 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2005.

145. Пастернак Ю.Г. Исследование направленных и частотных свойств линзы Люнеберга, реализованной с использованием свойств трансформационной оптики / Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, С.М. Федоров, Е.А. Ищенко // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – №1. – С. 100-106.

146. Пастернак Ю.Г. Реализация линзы Люнеберга с использованием свойств трансформационной оптики / Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж. – Т. 5. – С. 180-186.

147. Пастернак Ю.Г. Исследование сферической линзы Люнеберга, состоящей из набора диэлектрических перфорированных дисков с отверстиями разного диаметра / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин, Е.А. Рогозин, С.М. Фёдоров // Антенны. – 2021. – № 6. – С. 13-22.

148. Беляев М.П. Сравнительный анализ конструкций сферических линз Люнеберга / М.П. Беляев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 8. – С. 91-100.

149. Нерегулярная линза и многолучевая антенная система с двумя ортогональными поляризациями на ее основе: пат. 2765570 Рос. Федерация: МПК H01Q 15/02, H01Q 21/08 / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин; патентообладатель Акционерное общество научно-производственное

предприятие «Автоматизированные системы связи». Дата подачи заявки: 09.02.2021. Опубликовано: 01.02.2022.

150.Рогозин Р.Е. Многолучевая антенная система для мобильного терминала высокоскоростной спутниковой связи / Р.Е. Рогозин, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин // Сборник тезисов 21-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика». Москва, 2022. – С. 309-310.

151.Пастернак Ю.Г. Синфазная антенная решетка на основе нерегулярной линзы из однородного диэлектрика для мобильного терминала спутниковой связи / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, Р.Е. Рогозин // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 2. – С. 60-67.

152.Пастернак Ю.Г. Синфазная печатная антенная решетка с механическим управлением линейной поляризацией для мобильного терминала спутниковой связи / Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, Р.Е. Рогозин // Теория и техника радиосвязи. – 2023. – № 2. – С. 68-75.

Приложение А.
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2765570

**НЕРЕГУЛЯРНАЯ ЛИНЗА И МНОГОЛУЧЕВАЯ
АНТЕННАЯ СИСТЕМА С ДВУМЯ
ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ НА ЕЕ
ОСНОВЕ**

Патентообладатель: *Акционерное общество НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ" (RU)*

Авторы: *Пастернак Юрий Геннадьевич (RU), Пендюрин Владимир Андреевич (RU), Rogozin Руслан Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2021103147

Приоритет изобретения 09 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 февраля 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 февраля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Приложение Б.

Акты внедрения результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по науке
ФГБОУ ВО «ВГТУ»

Проздов И.Г.

«25» мая 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации
в учебный процесс Воронежского государственного технического университета

Наименование диссертации: Многолучевые линзовые антенны для аппаратуры связи.

Автор: Рогозин Руслан Евгеньевич.

Научный руководитель: Пастернак Юрий Геннадьевич.

Диссертация выполнена в Воронежском государственном техническом университете на кафедре радиоэлектронных устройств и систем, в рамках основного научного направления – Исследование и разработка многолучевых сверхширокополосных антенных систем.

Результаты научно-исследовательской работы внедрены в учебный процесс ВГТУ на основании решения кафедры радиоэлектронных устройств и систем от «31» мая 2023 г., протокол № 19

1. Вид результатов, внедренных в учебный процесс:

– методика проектирования метаматериальных многолучевых линзовых антенн, реализованных на основе параллельных печатных плат;
– методика снижения уровня боковых лепестков в линейных синфазных антенных решетках, состоящих из электрически больших линзовых излучателей.

2. Области применения:

– лекционные, лабораторные, практические занятия, курсовое проектирование и 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 в области искусственных диэлектриков и метаматериалов, методов синтеза и анализа многолучевых линзовых антенн и антенных решеток.

Проректор по учебной работе

А.И. Колосов

«1» июня 2023 г.

Декан факультета ФРТЭ

В.А. Небольсин

«31» мая 2023 г.

Заведующий кафедрой РЭУС

Д.В. Журавлев

«31» мая 2023 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор и научный руководитель
АО НПП «Автоматизированные системы связи»
(г. Воронеж), к.т.н.

Демидов Владимир Андреевич
« 5 » Июня 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации Рогозина Руслана Евгеньевича, выполненной на
соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе: председателя комиссии – ведущего научного сотрудника АО НПП «Автоматизированные системы связи», к.т.н. Попова И.В., начальника сектора Гусева Б.Л., ведущего инженера-конструктора Агаркова И.В. и заместителя генерального директора по общим вопросам Демидовой И.Д., подтверждает, что перечисленные ниже результаты, полученные Рогозиным Р.Е., внедрены в АО НПП «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж).

ПЕРЕЧЕНЬ ВНЕДРЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

№	Наименование внедренных результатов	Итоговая эффективность внедренных результатов
1	Методика, позволяющая уменьшить анизотропию в печатных периодических структурах за счет использования поперечных металлических штырьков, впаянных перпендикулярно печатной плате.	Разработана широкополосная полноазимутальная антенная система на основе полусферической метаматериальной линзы, состоящей из печатных плат из тонкого стеклотекстолита. В качестве ячейки периодической структуры используется метаматериал, обладающий минимальной дисперсией, на основе иерусалимского креста с впаянным в центре металлическим штырем.
2	Конструкция двухкоординатной многолучевой антенны на основе многослойной печатной линзы.	Разработана двухкоординатная многолучевая антенна на основе многослойной печатной платы с развязкой по поляризации между облучателями и антенной – облучатели линзы имеют линейную поляризацию, а антенная система – круговую.
3	Методика расчета эффективной диэлектрической проницаемости периодической структуры в виде отверстий в диэлектрике.	Усреднение эффективных проницаемостей по двум поляризациям (параллельная и перпендикулярная оси воздушного отверстия) позволяет минимизировать анизотропию периодической структуры в виде отверстий в диэлектрике. Разработана сферическая линза Лунеберга, состоящая из перфорированных диэлектрических дисков.

4	Методика, позволяющая снизить уровень боковых лепестков в линейных синфазных антенных решетках из электрически больших линзовых излучателей.	Использование усеченных линзовых элементов (нерегулярная линза) позволяет снизить уровень боковых лепестков за счет выравнивания амплитудного распределения поля в раскрыте антенны. Разработаны антенные системы на основе нерегулярной линзы различных конструкций.
---	--	---

Председатель комиссии



Попов И.В.

Члены комиссии



Гусев Б.Л.



Агарков И.В.



Демидова И.Д.