



На правах рукописи

Сбитнев Никита Сергеевич

**НЕОДНОРОДНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ
УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет» на кафедре электроники физического факультета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Усков Григорий Константинович

Официальные оппоненты: **Разиньков Сергей Николаевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
(г. Воронеж), факультет авиационного оборудова-
ния летательных аппаратов, кафедра автоматиза-
ции управления летательными аппаратами (и вы-
числительных систем), доцент

Ахияров Владимир Влерович,
кандидат технических наук, АО «НПК «Научно-ис-
следовательский институт дальней радиосвязи» (г.
Москва), научно-тематический центр - 2,
ведущий инженер

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования «По-
волжский государственный университет телеком-
муникаций и информатики» (г. Самара)

Защита состоится «15» декабря 2022 года в 15:10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, дом 1, физический факультет, аудитория 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте:

<http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3460>

Автореферат разослан «___» октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степкин В.А.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию методов расширения диапазона рабочих частот сверхширокополосных излучателей с использованием пространственных диэлектрических структур. В рамках работы рассматривается возможность применения исследуемых структур для создания многолучевой сверхширокополосной излучающей системы.

Актуальность. Современное состояние теории и техники сверхвысоких частот (СВЧ) позволяет выделить область, связанную с изучением различного рода сверхширокополосных (СШП) систем, в отдельное направление радиофизики. Большое разнообразие задач, рассматриваемых в этом направлении, таких как генерация, излучение и распространение, прием и обработка СШП сигналов, требует разработки новых подходов и методов, а также модификации существующих.

В данной диссертационной работе подробно рассматриваются СШП излучатели. Наиболее часто для этого применяются так называемые апертурные излучатели, к которым относятся рупоры на ТЕМ волнах. Их характерной особенностью является то, что в излучении участвуют сравнительно большие проводящие поверхности, по которым протекают токи высокой частоты. Малая длина волны в рассматриваемом частотном диапазоне позволяет создавать ортонаправленные излучатели и излучатели с диаграммой направленности (ДН) сложной формы со сравнительно небольшими размерами.

Классическая теория, описывающая излучение и распространение электромагнитных (ЭМ) волн, основанная на решении уравнений Максвелла в исходном виде, ограниченно применима для СШП излучателей в силу своей громоздкости и невозможности получения строгих аналитических решений. В XX и XXI вв. были предложены и исследованы другие подходы: апертурная теория, метод импульсных характеристик, теория эйконалов.

Проблема синтеза и анализа апертурных излучателей зачастую сводится к задаче улучшения характеристик направленности. Для решения этой задачи обычно варьируются размеры и форма раскрыва. Так, в ряде известных работ определяются оптимальные геометрические размеры зеркальных излучателей и ТЕМ-рупоров с различными типами профиля. Однако существуют другие методы, позволяющие добиться улучшения характеристик излучателя, за счет применения структур из диэлектрического материала. Большое число исследований и литературных источников предлагают использовать для этой цели линзы из однородного диэлектрика, которые помещаются в раскрыв рупорного излучателя. В настоящей работе исследуются неоднородные диэлектрические структуры, позволяющие существенно улучшить характеристики излучения и предотвратить искажения диаграмм направленности.

Также важным направлением исследований, проводимых в данной работе, является разработка многолучевых излучателей, которые дают возможность быстрого обнаружения и одновременного сопровождения нескольких объектов в пространстве в радиолокационных системах и системах связи. В настоящее время, как правило, многолучевые системы представляют собой набор однолучевых излучателей, что, например, широко распространено в системах сотовой

связи. Вопрос же создания многолучевого СШП излучателя на основе единственного излучателя пока недостаточно изучен.

Таким образом, развитие методов синтеза многолучевых излучателей, а также возможность дополнения их диэлектрическими структурами с целью улучшения характеристик является актуальным и требует дальнейшего исследования.

Степень разработанности темы. В большинстве случаев в литературе применение диэлектрических линз и структур совместно с СШП излучателями сводится либо к задаче улучшения согласования, либо к задаче улучшения формы ДН и повышения коэффициента направленного действия (КНД). Однако обычно эти вопросы рассматриваются, если не в отрыве друг от друга, то, зачастую, параллельно и не системно. Особенно это относится к исследованиям неоднородных диэлектрических структур, для которых различными способами достигается требуемая диэлектрическая проницаемость.

Также мало внимания в литературе уделяется вопросам улучшения характеристик рупоров, в частности повышения уровня КНД и снижения уровня боковых лепестков ДН, без изменения их размеров. Такие задачи довольно часто встречаются в различных приложениях радиолокации и связи, где присутствуют жесткие требования, ограничивающие размеры излучающей системы.

Кроме того, недостаточно полно освещена в литературе проблема синтеза многолучевых СШП излучателей и излучателей со сканирующим лучом, созданных на основе одного излучателя с широким диапазоном углов сканирования.

Целью диссертационной работы является исследование влияния неоднородной диэлектрической среды на форму волнового фронта в раскрыве апертурного СШП излучателя и разработка многолучевого излучателя на основе ТЕМ-рупора с использованием диэлектрического заполнения.

В соответствии с поставленной целью в работе были **сформулированы и решены** следующие задачи:

1. Ввести количественные характеристики, максимально полно описывающие качество работы СШП излучателя по его КНД, ДН и согласованию.

2. Показать применимость диэлектрических структур для расширения рабочего диапазона частот ТЕМ-рупора и получить аналитические выражения для распределения диэлектрической проницаемости в такой структуре.

3. Разработать методы реализации структур с заданной диэлектрической проницаемостью для исследования модифицированных СШП излучателей. Оценить корректность выводов о расширении рабочего диапазона частот ТЕМ-рупора по согласованию и по КНД, а также оценить потери энергии ЭМ волны при распространении внутри диэлектрика.

4. Разработать многолучевой СШП излучатель с диэлектрической структурой, позволяющей улучшить ДН в широком диапазоне углов сканирования.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Выведены аналитические выражения для неоднородных диэлектрических сред со ступенчатым изменением диэлектрической проницаемости.

2. Предложена модель структуры на основе аналитических выражений

для неоднородных диэлектрических сред. Данная структура применена для заполнения пространства между лепестками ТЕМ-рупора. Получены экспериментальные и численные результаты, позволившие сделать вывод о существенном улучшении характеристик излучения и согласования за счет трансформации волнового фронта в раскрыве рупора.

3. Введена количественная характеристика и методика ее измерения для оценки диапазона частот, на котором ДН излучателя не испытывает искажений.

4. Разработана методика формирования неоднородных диэлектрических структур с заданным значением диэлектрической проницаемости для приложений СВЧ диапазона. В данных средах пространственное распределение диэлектрической проницаемости подчиняется полученным аналитическим выражениям за счет введения воздушных полостей по закону Лихтенеккера.

5. Построена модель многолучевого ТЕМ-рупорного СШП излучателя с несколькими входами, дополненного цилиндрической линзой Люнеберга. Каждый из таких входов соответствует фиксированному частотно независимому направлению излучения.

Теоретическая и практическая значимость представленной диссертационной работы заключается в развитии методов системного улучшения характеристик СШП излучателей. Рассмотренные на примере ТЕМ-рупора подходы к анализу характеристик излучения и, основанные на этом способы синтеза излучателей с заданными характеристиками могут быть применены к другим типам апертурных излучателей.

Представленные результаты и аналитические выражения в дальнейшем могут существенно сократить время и сложность разработки СШП излучателей за счет того, что они во многих случаях позволяют свести сложные электродинамические расчеты к методам геометрической оптики.

Разработанный многолучевой излучатель может найти применение в приложениях радиолокации и навигации, где требуются ДН сложной формы или необходимо сканирование пространства. Ценность предложенного излучателя относительно фазированных антенных решеток (ФАР) состоит в существенно меньших размерах и стоимости изготовления.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационном исследовании задач применялись различные методы: методы физической и геометрической оптики, метод эйконолов. В ходе электромагнитного моделирования использовался метод конечных разностей во временной области (FDTD) и метод конечных интегралов (FIT).

В рамках проведенных экспериментов применялись стандартные методы радиофизического эксперимента, а также теории и измерения параметров электрических цепей. При проведении экспериментальных исследований применялось современное оборудование и аттестованные приборы. Полученные в результате массивы данных обрабатывались в пакете для математического моделирования Matlab.

Достоверность результатов работы доказывается корректным применением соответствующих физических и математических моделей и методов. Все

полученные аналитически выражения были подтверждены с помощью электродинамических моделей и затем экспериментально. Результаты исследований сравнивались со схожими, описанными в литературе и обнаруживали высокую степень совпадения. Все, наблюдаемые в ходе экспериментов и моделирования, эффекты и закономерности систематически воспроизводимы.

Внедрение научных результатов. Результаты диссертации использованы в рамках научного проекта № 19-31-27001, выполненного при финансовой поддержке РФФИ, а также проекта №21-19-00323, поддержанного Российским научным фондом.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Максимально возможный частотный диапазон по параметру искажения диаграммы направленности для сверхширокополосного ТЕМ-рупора при фиксированных размерах апертуры достигается на малых углах раскрытия.

2. Диэлектрическое заполнение с пространственно-распределенной диэлектрической проницаемостью, позволяющее трансформировать сферический волновой фронт в плоский, расширяет частотный диапазон ТЕМ-рупора по параметру искажения диаграммы направленности на 11 ГГц при заданных размерах.

3. Способ формирования слоистых структур из однородного диэлектрика для практической реализации сред с пространственным распределением диэлектрической проницаемости на основе логарифмического закона смешения.

4. Многолучевой излучатель на основе модифицированного ТЕМ-рупора осуществил возможность формирования диаграммы с разными направлениями излучения при коммутации соответствующих входов.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, обсуждались и докладывались на следующих конференциях:

1. VII Всероссийская микроволновая конференция (г. Москва-2020);
2. Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: РЭУС – 2016 (г. Москва);
3. XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) (Kyiv-2017);
4. Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC) (Saint Petersburg-2019);
5. IET International Radar Conference (Nanjing city, China - 2018);
6. XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2016-2021).

Личный вклад автора. Автор диссертации выполнил основной объем работы и получил ключевые результаты лично. Научный руководитель участвовал в постановке задач и выработке концепции исследований. Лично автором были выведены аналитические зависимости, разработаны ЭД модели исследуемых излучателей, спланированы и проведены эксперименты, а также выполнена обработка и анализ полученных данных.

Публикации. Результаты диссертации были опубликованы в 17 научных работ по теме представленного исследования. Среди этих работ 2 входят в перечень ВАК РФ и 6 индексируются базами Scopus и Web of Science.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Так же она содержит список сокращений и условных обозначений и список источников, которые были использованы при ее подготовке. Всего в диссертации содержится: 118 страниц, 47 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 152 источника.

Основное содержание работы

Во введении сформулирована актуальность работы, поставлена цель и задачи диссертации, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности исследования, апробация работы, личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому и численному анализу ЭМ поля апертурного излучателя. В начале главы приведен краткий литературный обзор исследуемой научной области. Рассмотрена история изучения СШП систем, а также основные области их применения. Описаны главные цели и задачи, стоящие в настоящее время перед разработчиками таких систем, и направления дальнейших исследований. В рамках литературного обзора рассмотрены основные подходы к анализу ЭМ поля апертурного излучателя: апертурная теория, метод импульсных характеристик, метод «электромагнитного заряда».

Построена численная модель ТЕМ-рупора и проведен анализ ЭМ поля в его апертуре. Показано, что существуют определенные требования, необходимые для эффективной работы излучателя. Высота раскрытия апертуры ТЕМ-рупора должна быть приблизительно равна половине длины волны нижней рабочей частоты. Кроме того, разность фаз излучаемой волны во всех точках плоскости апертуры должна быть минимальной. Данное условие нарушается с увеличением частоты возбуждающего излучателя сигнала за счет разного набега фаз, что является причиной существенных искажений ДН.

Для оценки качества работы излучателя в диссертации вводится понятие частотного диапазона по коэффициенту усиления. При определении граничных частот по направленности выбран критерий превышения максимального усиления (G_2) в определенном направлении φ над усилением в основном направлении (G_1 , излучение по оси Z , $\varphi = 0$) более чем на 1 дБ. Это схематично поясняется на рисунке 1. Разница между двумя этими коэффициентами ($\Delta G = G_2 - G_1$) рассчитывается для каждой частоты, и находятся F_{max} и F_{min} в диапазоне которых $\Delta G < 1$ дБ. На рисунке 2 изображены частотные диапазоны исследуемого ТЕМ-рупора по искажению ДН и по согласованию (по уровню КСВН = 2). Зависимость приведена относительно половины апертурного угла, при этом размер апертуры оставался постоянным, а длина рупора варьировалась.

С помощью численного моделирования показано, что ЭМ поле внутри ТЕМ-рупора можно с высокой точностью рассматривать как поле сферической волны, распространяющейся из фазового центра.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию неоднородных

диэлектрических структур, применяемых в СШП излучателях для улучшения их характеристик. Рассматриваются общие подходы к построению линзовых антенн и антенн с заполнением, описаны основные их типы и конструкции.

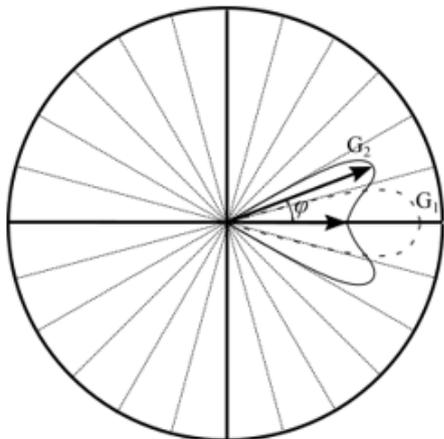


Рисунок 1 – Определение максимального коэффициента усиления G_2 и коэффициента усиления в главном направлении G_1 .

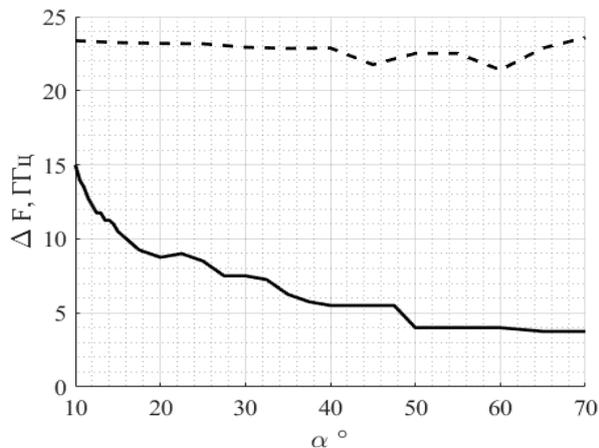


Рисунок 2 – Ширина частотного диапазона ТЕМ-рупора относительно половины апертурного угла по коэффициенту усиления (сплошная линия) и по согласованию (штриховая линия).

Показано, что одним из способов улучшения характеристик ТЕМ-рупора является минимизация разницы фаз ЭМ поля в его апертуре. На основе данных, полученных в первой главе, формируется процедура трансформации волнового фронта. Данная процедура состоит в компенсации времени распространения луча (в приближении геометрической оптики) на пути по прямой от фазового центра до плоскости раскрытия излучателя путем замедления скорости распространения. Это поясняется на рисунке 3, где представлена горизонтальная проекция ТЕМ-рупора.

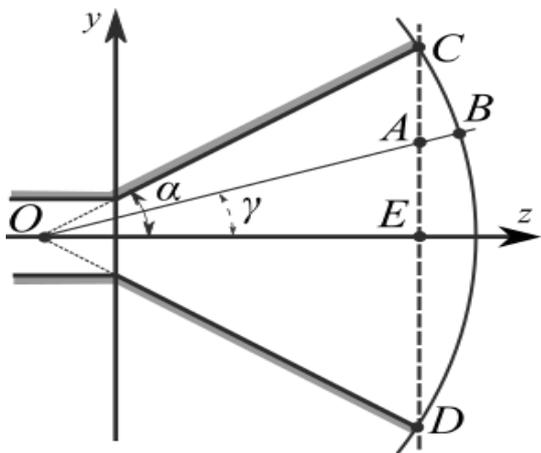


Рисунок 3 – Трансформация волнового фронта. Вид в горизонтальной проекции.

Луч, распространяющийся под углом γ к оси z , в рассматриваемый момент времени достигает точки B . Для минимизации разницы фаз необходимо внести такую задержку в распространение луча OB , чтобы к рассматриваемому моменту времени он достиг только точки A , лежащей на прямой CD . Прямая CD является проекцией плоскости апертуры рупора. Вносить задержку в распространение лучей предлагается с помощью применения материалов с различной диэлектрической проницаемостью.

В работе выводится аналитическое выражение для распределения диэлектрической проницаемости, в которое входят размеры рупора и направление луча. Направление луча может быть также задано координатами на апертурной плоскости. Исходя из соображений физической реализуемости диэлектрическая проницаемость при максимальном отклонении от центра выбирается равной 1.

$$\varepsilon(x, y) = \frac{\left(\frac{H_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{B_2}{2}\right)^2 + (L_2 + p)^2}{x^2 + y^2 + (L_2 + p)^2} \quad (1)$$

Рисунок 4 поясняет формулу (1), а на рисунке 5 изображено двумерное распределение диэлектрической проницаемости в апертуре рупора.

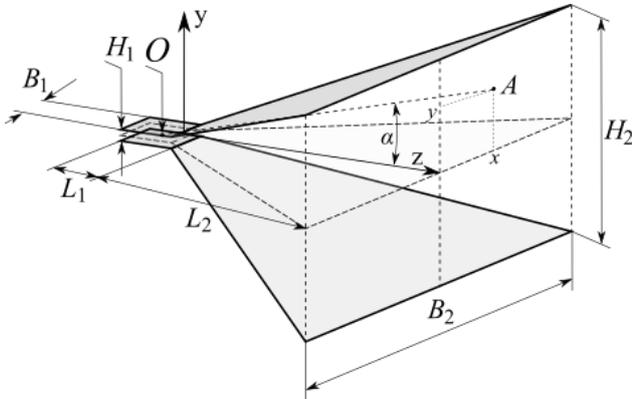


Рисунок 4 – К выводу закона распределения диэлектрической проницаемости.

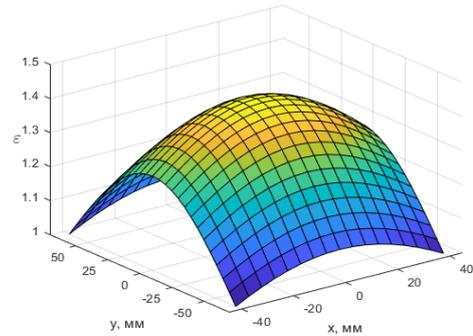


Рисунок 5 – Двумерное распределение диэлектрической проницаемости в зависимости от координат в плоскости апертуры.

В диссертации строится модель ТЕМ-рупора с заполнением диэлектриком пространства между лепестками. Закон распределения проницаемости требует плавного изменения ε , но добиться строгого соблюдения этой формулы трудно даже при численном моделировании. Поэтому в работе используется следующее приближение: пространство между лепестками антенны заполняется блоками в форме косых пирамид с прямоугольным основанием. При этом вершинами всех таких пирамид является точка фазового центра, а основания образуют прямоугольную сетку в излучающей плоскости рупора. Каждой пирамиде был назначен материал с проницаемостью ε_{ij} , соответствующей зависимости (1), где в качестве координат (x, y) взяты координаты центра основания пирамиды. Этот процесс проиллюстрирован на рисунке 6.

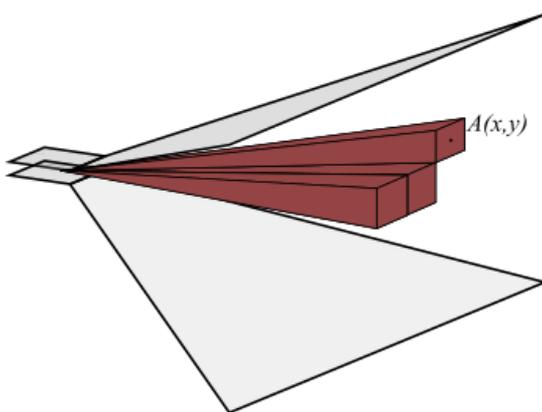


Рисунок 6 – Заполнение пространства между лепестками ТЕМ-рупора пирамидальными блоками с различной диэлектрической проницаемостью.

В предельном случае таких пирамид должно быть бесконечно много. Но эмпирически установлено, что при $i, j > 20$ характеристики антенны не существенно меняются с увеличением i, j . Было выбрано $i = j = 21$, таким образом модель ТЕМ-рупора была заполнена 441 пирамидой с различными ε_{ij} .

На рисунке 7 представлены ДН на частотах 5, 10, 15, 20 ГГц, где сплошной линией обозначены зависимости для антенны с диэлектрическим заполнением, пунктиром – для исходной антенны.

У антенны с диэлектрическим

заполнением присутствует значительное улучшение направленных свойств: на всех частотах наблюдаются более высокий коэффициент усиления в главном направлении и меньший уровень боковых лепестков. Также введение диэлектрического заполнения предотвратило распад главного лепестка ДН на частоте 20 ГГц. Для излучателя с заполнением также было оценено изменение величины рабочего диапазона частот $\Delta F = F_{max} - F_{min}$, представленное на рисунке 8 по сравнению со случаем без диэлектрического заполнения.

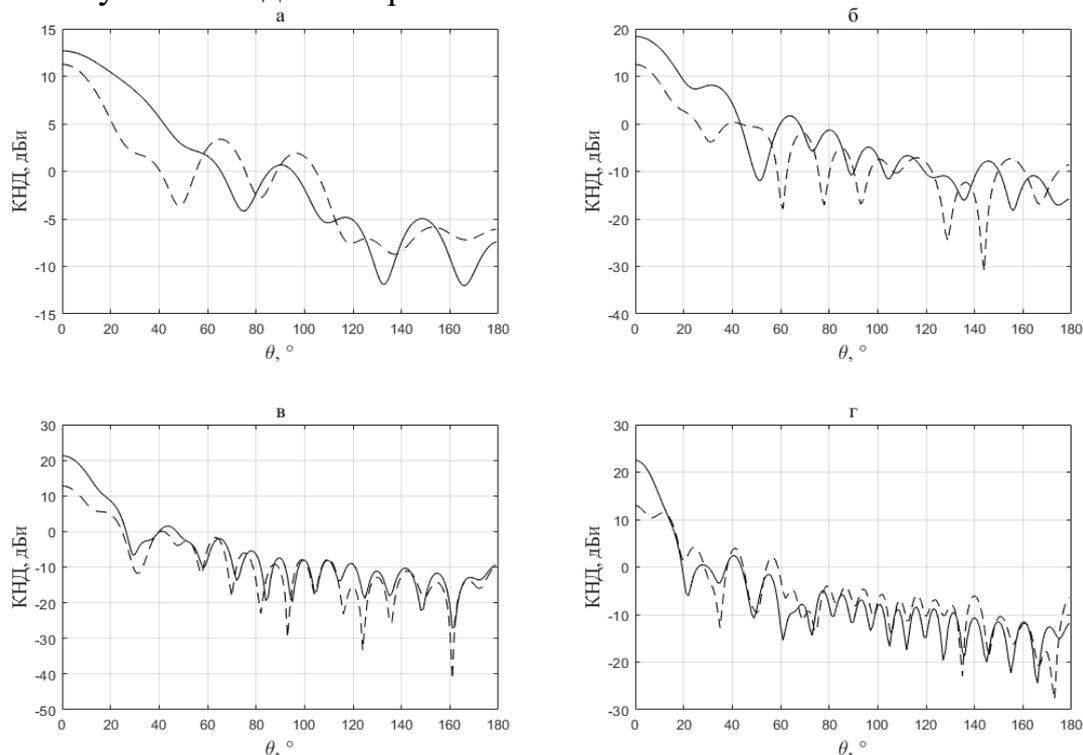


Рисунок 7 – Диаграммы направленности ТЕМ-рупора с заполнением (сплошная линия) и без заполнения (пунктир) на частоте 5 (а), 10 (б), 15 (в), 20 (г) ГГц.

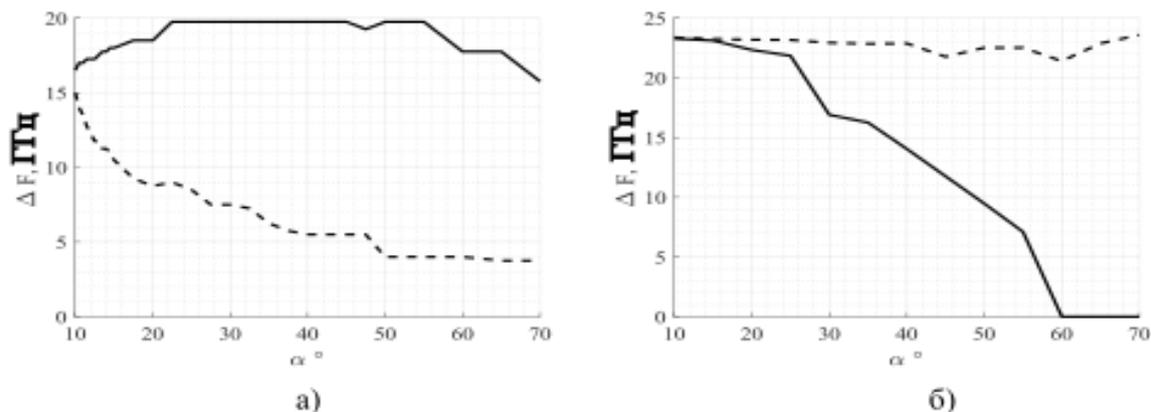


Рисунок 8 – Рабочая полоса частот по усилению (а) и по согласованию (б) относительно половины апертурного угла. Зависимости для ТЕМ-рупора без диэлектрической структуры показаны штриховой линией, а для излучателя со структурой – сплошной.

Рабочая полоса частот по коэффициенту усиления заметно увеличивается для излучателя с диэлектрической структурой во всем диапазоне углов раскрытия. По согласованию полоса частот увеличивается на ~400 МГц в диапазоне углов 10..40 градусов, но понижается между 40 и 70 градусами. Это происходит из-

за уменьшения длины антенны и вызываемого этим быстрого роста отражения от границы раздела сред (диэлектрик - воздух) в плоскости апертуры.

Анализ ЭМ поля внутри ТЕМ-рупора позволяет предположить, что дискретный фазовый центр может быть заменен «континуумом» фазовых центров, размещенных на плоскости запитки, которая полностью участвует в процессе излучения. Вследствие этого формула (1) модифицируется:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{\left(\frac{H_2 - H_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{B_2 - B_1}{2}\right)^2 + (L_2 - L_1)^2}{x^2 \left(1 - \frac{B_1}{B_2}\right)^2 + y^2 \left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right)^2 + (L_2 - L_1)^2}, \quad (2)$$

В данном случае заполнение пространства между лепестками рупора в численной модели производится усеченными пирамидами, большое и малое основания которых располагаются в плоскостях апертуры и запитки соответственно. Проведенное электродинамическое моделирование излучателя с таким заполнением показывает, что его характеристики согласования и направленности изменяются несущественно, за исключением снижения на 1-2 дБ уровня боковых лепестков ДН на частотах более 10 ГГц. Рассмотрение диэлектрического заполнения, построенного исходя из предположения о распределенном фазовом центре, важно с теоретической точки зрения, но оно не обеспечивает существенного повышения характеристик и усложняет практическую реализацию.

Третья глава диссертации посвящена созданию неоднородных диэлектрических структур. Предлагается способ формирования таких структур с заданной диэлектрической проницаемостью на основе трехмерной печати по методу FDM (fused deposition modeling). Для этого требуемая диэлектрическая проницаемость достигается комбинацией смеси двух диэлектриков. Если включения инородного материала в диэлектрик малы по размерам и достаточно равномерно распределены по объему, то такую смесь можно считать статистической (хаотической, неупорядоченной в пространстве). Для расчета такой смеси обычно применяется формула Лихтенеккера, носящая название логарифмического закона смешения. Для смеси двух компонентов имеет вид:

$$\ln \varepsilon = Q_1 \ln \varepsilon_1 + Q_2 \ln \varepsilon_2, \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость смеси, Q_1, Q_2 и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – доли объемного содержания и диэлектрические проницаемости компонент смеси соответственно.

В качестве основного материала для заполнения был выбран полистирол. Это обосновано его удобством при 3D печати и малыми потерями в микроволновом частотном диапазоне ($\tan \delta = 5.73 \cdot 10^{-4}$). Вторым материалом являлся воздух. Образец диэлектрического материала был составлен из дискретных слоев, разделенных на ячейки. Размер дискретных элементарных ячеек был равен $\Delta x \times \Delta y$, как показано на рисунке 10. Каждая из этих элементарных ячеек имела прямоугольный воздушный зазор с размерами $a \times b$. Таким образом, элементарная ячейка представляет собой полимерный куб из полистирола с воздушной пустотой в центре. Желаемая переменная относительная диэлектрическая проницаемость достигается путем изменения коэффициента заполнения $a = S \Delta x$, $b = S \Delta y$, где S – коэффициент заполнения. Для улучшения свойств изотропности

единичные ячейки сдвигаются на $y/2$ (в направлениях x и y соответственно) на каждом нечетном слое, как показано на рисунке 10. В работе были изготовлены образцы с различными коэффициентами объемного заполнения, и экспериментально определена их диэлектрическая проницаемость в измерительной волноводной линии. Фотографии образцов представлены на рисунке 11.

При трехмерной печати диэлектриков были выявлены погрешности задаваемых коэффициентов заполнения по объему за счет температурных искажений. Для применения формулы Лихтенеккера была экспериментально получена зависимость связывающая коэффициент заполнения 3D модели по весу S_w от коэффициента заполнения по объему S , приведенная в (4).

$$S_w = 0.002 - 0.019 S + 0.436 S^2 + 0.582 S^3 \quad (4)$$

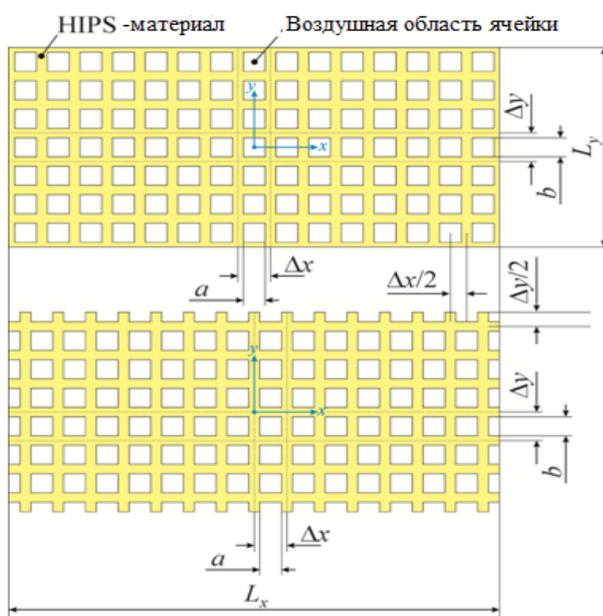


Рисунок 10 – Четный (сверху) и нечетный (снизу) слои 3-D модели диэлектрического материала.

Рассчитанная диэлектрическая проницаемость образцов и экспериментально измеренные точки с учетом (4) представлены на рисунке 12. Видно, что экспериментальные значения точно ложатся на теоретическую кривую. Полученные результаты имеют большое прикладное значение: формулы и доступные технологии трехмерной печати позволяют с высокой точностью создавать диэлектрические материалы с заданной проницаемостью.

Далее в главе рассмотрен процесс создания диэлектрического заполнения с переменной проницаемостью для ТЕМ-рупора. Идея построения, как и в случае с заполнением пирамидальными блокам, состоит в создании структуры,

которая имеет определенную диэлектрическую проницаемость в заданном направлении распространения луча из фазового центра к апертуре.

Из соображений простоты выкладок и печати, а также, чтобы исключить отражения от границы воздух-диэлектрик в плоскости запитки, был выбран случай дискретного фазового центра. Апертурная плоскость разбивается на прямоугольные области, в центре которых определяется требуемая диэлектрическая проницаемость в соответствии с выражением (1). Внутренняя часть каждого такого прямоугольника остается заполненной воздухом, а размер этой области определяется из формулы Лихтенеккера с учетом (4). Формирование линзы ТЕМ-рупора производилось слоями толщиной 0.6 мм, один из таких слоев представлен на рисунке 13.



Рисунок 11 – Фотография образцов диэлектрического материала с различным коэффициентом заполнения.

Для экспериментальной проверки полученных выражений был изготовлен ТЕМ-рупор и напечатана структура к нему. Собранный ТЕМ-рупор и напечатанное заполнение для него показаны на рисунке 14.

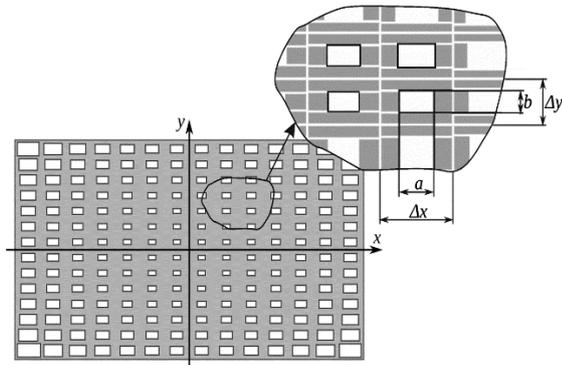
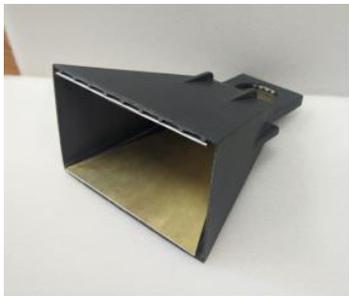
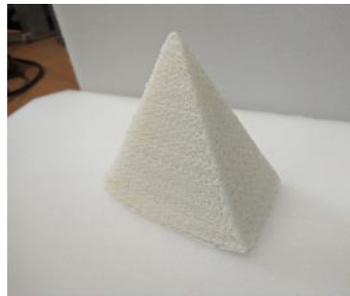


Рисунок 13 – Плоскость раскрыва ТЕМ-рупора, разбитая на ячейки.

Экспериментальное измерение характеристик антенны производилось в безэховой камере. Измеренные значения ДН (нормированные на максимальное значение) изображены на рисунке 15. Также на нем для сравнения представлены значения, полученные в результате моделирования. Видно, что экспериментальные ДН ТЕМ-рупора хорошо согласуются с результатами моделирования. То же наблюдается и для КСВН (рисунок 16). Из рисунка 17 видно, что коэффициент усиления в главном направлении увеличивается для антенны с диэлектрическим заполнением на широком диапазоне частот. Для оценки уровня потерь ЭМ энергии в диэлектрике были получены КПД рупоров. Для антенны с заполнением КПД падает не более чем на 5%.



а)



б)



в)

Рисунок 14 – Изготовленный ТЕМ-рупор (а), распечатанная линза (б) и рупор в сборе с линзой (в).

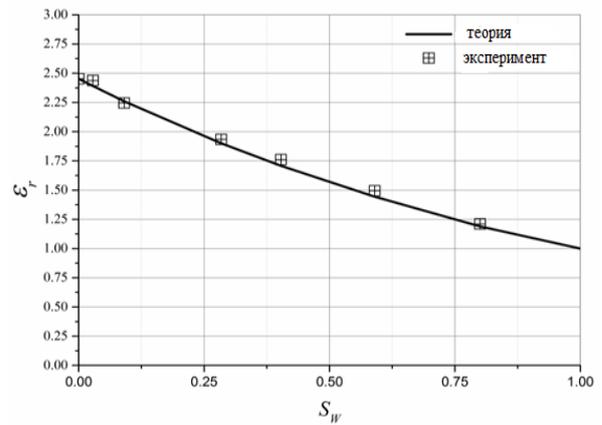


Рисунок 12 – Зависимость диэлектрической проницаемости от коэффициента заполнения по весу – S_w .

Рисунок 15 – Зависимость нормированного коэффициента усиления от частоты для антенны с диэлектрическим заполнением. Рисунок 16 – Зависимость коэффициента усиления от частоты для антенны с диэлектрическим заполнением. Рисунок 17 – Зависимость коэффициента усиления от частоты для антенны с диэлектрическим заполнением.

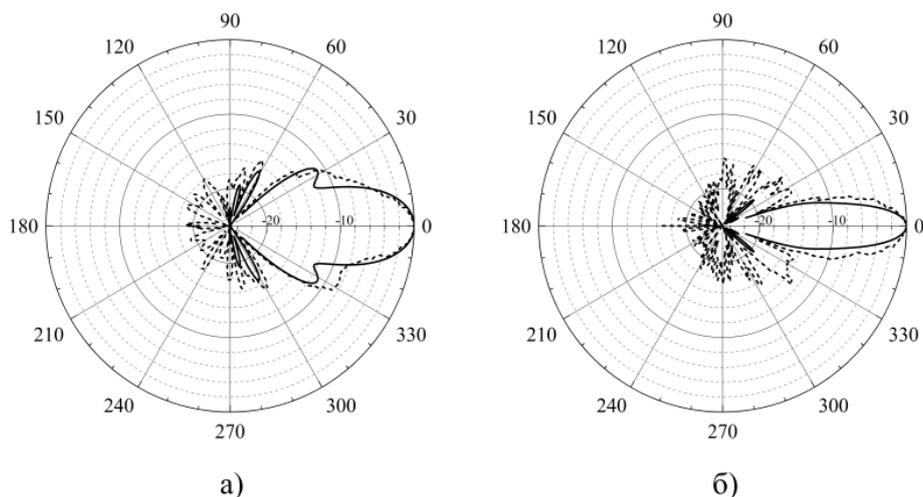


Рисунок 15 – Нормированные диаграммы направленности на 10 (а) и 20 (б) ГГц. Пунктиром показаны экспериментальные данные, а сплошной линией – результаты моделирования.

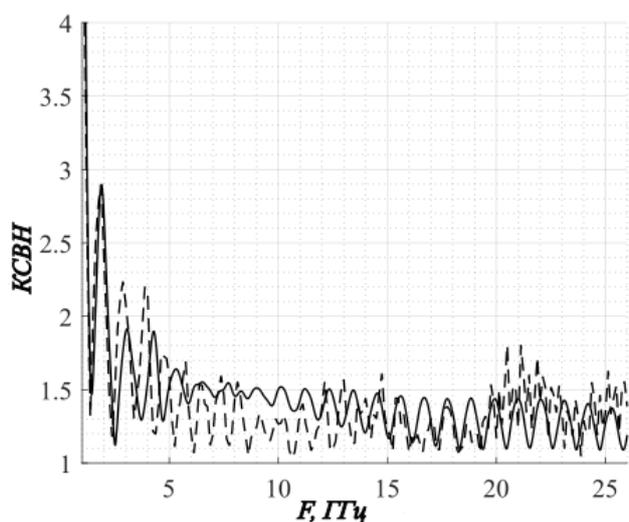


Рисунок 16 – КСВН изготовленного рупора с диэлектрическим заполнением (пунктир) и его модели (сплошная линия).

ТЕМ-рупора, дополненного линзой Лüneберга. Применяется частный случай линзы, при котором один из фокусов расположен на поверхности, а второй – в бесконечности (т.е. линза формирует плоский волновой фронт). В этом случае распределение показателя преломления выглядит следующим образом:

$$n = \sqrt{\varepsilon(R)} = \sqrt{2 - R^2} \quad (5)$$

Точная реализация требуемого закона объемного изменения коэффициента преломления $n(r)$ в линзе Лüneберга практически невозможна. Наиболее распространенный способ изготовления такой линзы – разбиение объема сферы (или цилиндра) на слои из однородных материалов, диэлектрическая проницаемость которых увеличивается от внешнего радиуса сферы к центру. В диссертации применяется модель линзы из 100 слоев.

В четвертой главе диссертации предложен многолучевой СШП излучатель и проведено его исследование. В начале главы предложено использование диэлектрического заполнения для случая, когда необходимо расширить главный лепесток ДН. Такой подход может использоваться при разработке фазированных антенных решетках (ФАР) для соответствия ширины ДН излучателя углам сканирования.

В диссертации предлагается модель многолучевого излучателя на основе модифицированного

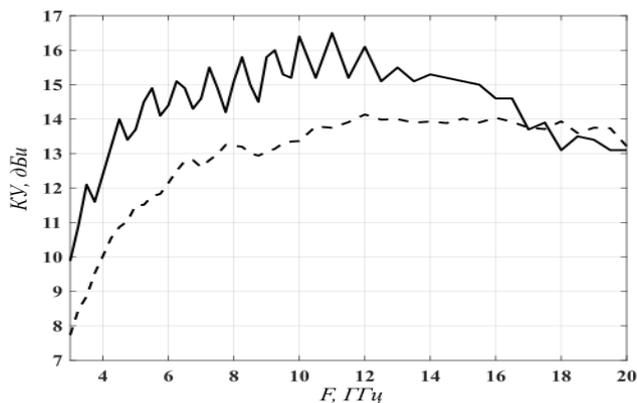


Рисунок 17 – Коэффициент усиления в главном направлении рупора с заполнением (сплошная линия) и без него (пунктир).

при помощи экспоненциального перехода, который обеспечивает плавное изменение волнового сопротивления от порта к антенне и позволяет добиться удовлетворительного согласования. Форма лепестков рупора изменена для расширения диапазона углов поворота главного лепестка ДН. Внешний контур излучающего элемента представляет собой половину окружности радиуса $R = 200$ мм.

При излучении в главном направлении используется центральный порт. Для того, чтобы отклонить луч, следует запитать антенну от другого порта, в зависимости от того, в какую сторону и насколько необходим поворот ДН.

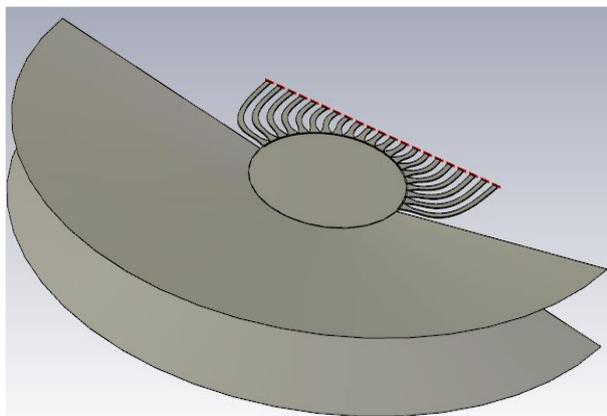


Рисунок 18 – ТЕМ-рупор с модифицированной системой запитки

На рисунках 19-20 изображены срезы ДН в горизонтальной плоскости на частотах 5 (а), 10 (б), 15 (в) и 20 (г) ГГц. На рисунке 19 представлены ДН при излучении в главном направлении. Видно, что на всех рассматриваемых частотах коэффициент усиления в главном направлении испытывает существенный прирост, который достигает максимума на частоте 15 ГГц (более 10 дБ). Так же для частот 10 – 20 ГГц после добавления линзы в антенну наблюдается уменьшение уровня боковых лепестков (на > 15 дБ).

Зависимости для порта № 7 представлены на рисунке 20. Как и при излучении в главном направлении, наблюдается сужение (с 30° до 10°) и увеличение по

Для обеспечения возможности излучения в разных направлениях одним рупором предлагается модифицировать его, добавив дополнительные линии запитки (рисунок 18). Это позволяет менять направление главного лепестка ДН путем переключения входов антенны, каждый из которых соответствует конкретному направлению излучения.

Для улучшения согласования эти линии запитки соединяется с окружностью радиуса $R = 50$ мм

Моделирование показывает, что сама по себе такая антенна не обеспечивает необходимую точность поворота луча при сохранении его качества: главный лепесток расширяется и испытывает склонность к искажению при углах излучения более $\pm 15^\circ$. Поэтому ТЕМ-рупор был дополнен цилиндрической линзой Люнеберга, расположенной у его основания между сферическими пластинами. Возмущения от линий запитки каждого из портов можно рассматривать как точечные источники на поверхности линзы.

амплитуде (на 8-10 дБ на 15-20 ГГц) главного лепестка, отклоненного на 49°. В диссертации показано, что добавление линзы Люнеберга обеспечивает частотную независимость направления главного лепестка в широком диапазоне. Многолучевость обеспечивается при запитке нескольких портов исследуемой системы (излучатель + линза), при этом число лучей равно числу запитываемых портов. Проблема реализации линзы Люнеберга решается методами создания материалов с заданной диэлектрической проницаемостью, описанными в третьей главе.

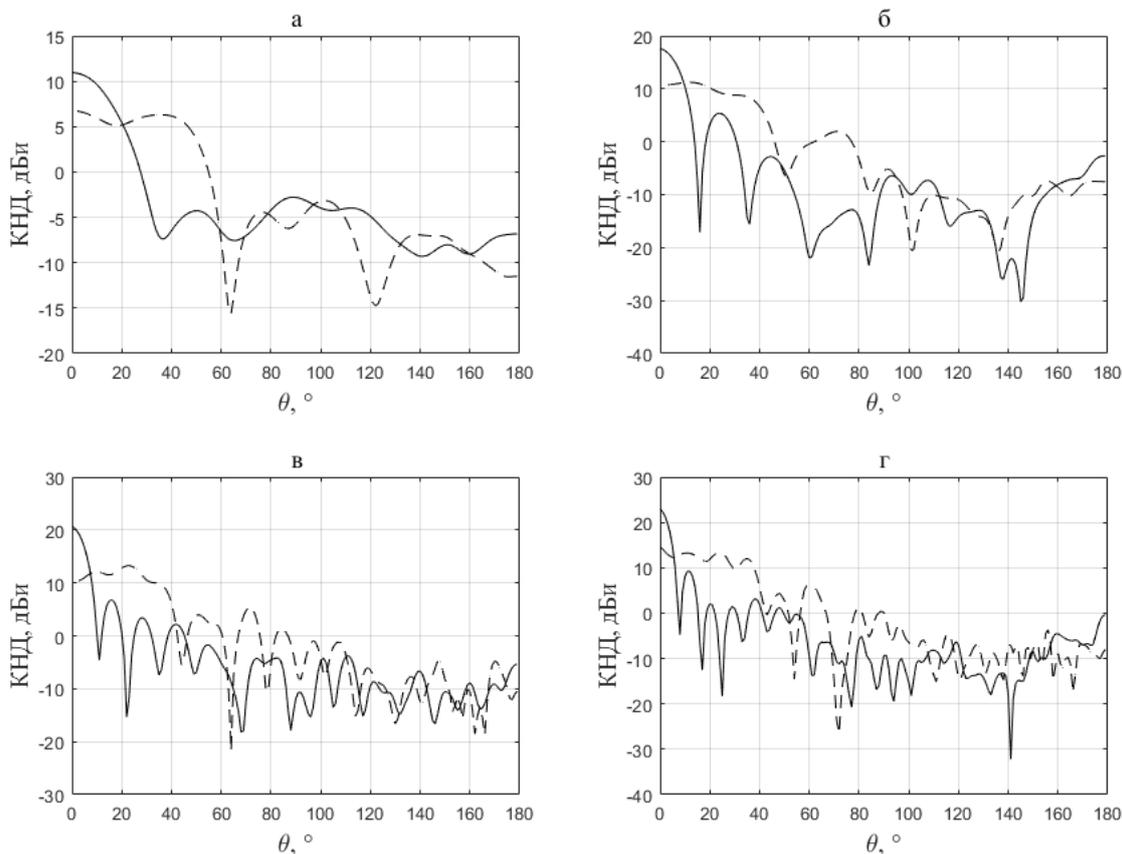


Рисунок 19 – Диаграммы направленности многолучевого ТЕМ-рупора при излучении в главном направлении (при запитывании с порта № 1). Пунктирная линия соответствует случаю без линзы Люнеберга, а сплошная – с линзой.

Заключение

В представленной диссертационной работе изложено исследование диэлектрического заполнения для сверхширокополосных излучателей на примере ТЕМ-рупора. Автором были рассмотрены различные варианты диэлектрических структур, а также методы их синтеза и анализа в зависимости от решаемой задачи.

Основные результаты и выводы по работе заключаются в следующем:

1. На примере ТЕМ-рупора рассмотрен рабочий диапазон частот, на котором ДН не испытывает искажений. Получен вывод о главных ограничивающих факторах ТЕМ-рупора: показано, что частотный диапазон по коэффициенту усиления ограничен сверху из-за наблюдаемого набега фаз на краях

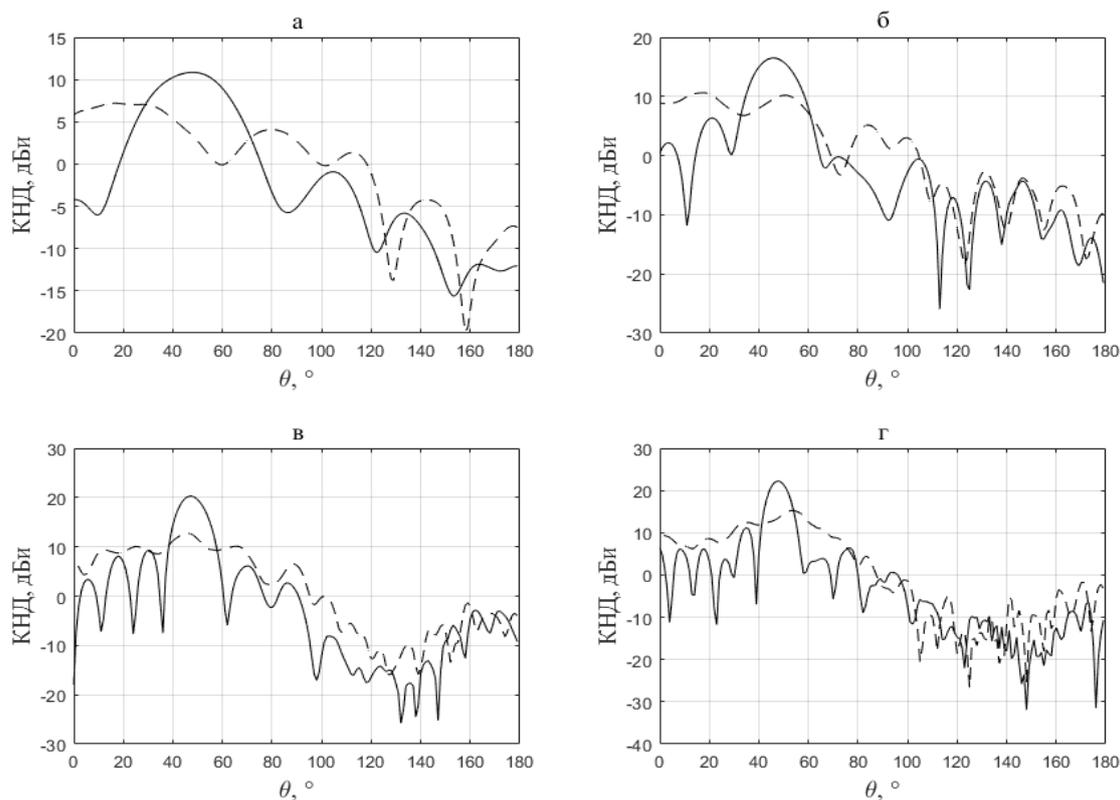


Рисунок 20 – Диаграммы направленности многолучевого ТЕМ-рупора при излучении на угол 49° (при запитывании с порта № 7).

лепестков антенны. Это приводит к распаду главного лепестка ДН. В то же время присутствует ограничение снизу, которое обусловлено необходимостью согласования антенны с линией запитки.

2. Получены аналитические выражения для неоднородной диэлектрической среды, позволяющей расширить рабочий диапазон частот ТЕМ-рупора по ДН за счет трансформации волнового фронта в раскрытие излучателя. Предложена модель заполнения пространства между лепестками ТЕМ-рупора со ступенчатым изменением диэлектрической проницаемости. Произведенные расчеты показывают, что частотный диапазон по коэффициенту усиления удастся расширить на 11 ГГц. Были найдены оптимальные соотношения для длины ТЕМ-рупора и угла его раскрытия. При этом были рассмотрены два случая: дискретного фазового центра и распределенного фазового центра. Для обоих подходов получены аналитические выражения, связывающие размеры излучателя и закон распределения диэлектрической проницаемости.

3. Предложены слоистые структуры из однородного диэлектрика, позволяющие на практике реализовать неоднородные диэлектрические среды для приложений СВЧ диапазона. Данные среды представляют собой квазистохастические структуры, диэлектрическая проницаемость которых подчиняется закону Лихтенеккера. Проведенные экспериментальные измерения показали высокую точность предложенных аналитических выражений для получения требуемой диэлектрической проницаемости.

4. Экспериментально изготовленный ТЕМ-рупор в ходе измерения его характеристик направленности и согласования на практике доказал

правильность полученных ранее выражений для распределения диэлектрической проницаемости в раскрыве рупора. Также были подтверждены совершенно незначительные потери ЭМ энергии в диэлектрике: не более чем 5%.

5. Предложен ТЕМ-рупорный СШП излучатель со сканирующим лучом с использованием неоднородной диэлектрической среды. Основой такого излучателя является ТЕМ-рупор с модифицированной линией запитки и дополненный цилиндрической линзой Люнеберга. Данная линза обеспечивает поворот ДН в широком диапазоне углов без ухудшения формы главного лепестка.

Основные публикации по теме диссертации

Список статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Синтез неоднородной диэлектрической среды для улучшения характеристик ТЕМ-рупора / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. С. Сбитнев**, Г. К. Усков. – Радиотехника. – 2016. – № 6. – С. 159 – 162.
2. Экспериментальное исследование ТЕМ-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. С. Сбитнев**, Г. К. Усков. – Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 6 – 11.

Список статей в научных журналах и материалах международных конференций, индексируемых Scopus и Web of Science

3. Bobreshov A.M., Uskov G.K., Kretov P.A., **Sbitnev N.S.** Ultrawideband TEM horn with inhomogeneous dielectric medium. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021; 63: 581– 586, doi.org/10.1002/mop.32622.
4. Bobreshov A.M., Uskov G.K., Lysenko N.A., Smuseva K.V., **Sbitnev N.S.** An ultrawideband TEM horn with dielectric filling characteristics investigation with the dependence on an aperture angle. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2022; 64: 1029- 1035. doi:10.1002/mop.33237.
5. Applying of Luneburg lens for multi-beam TEM-horn antenna / Bobreshov Anatoly M., Uskov Grigory K., Lysenko Nikolay A., **Sbitnev Nikita S.**, Potapov Alexander A. // *The Journal of Engineering*. — London, 2019. — Vol. 2019, Is.s. 20. - P. 6558-6561.— 0,3 п.л. — DOI: 10.1049/joe.2019.0255.
6. G. K. Uskov, P. A. Kretov, V. A. Stepkin, **N. S. Sbitnev** and A. M. Bobreshov, "Investigation of 3D printed dielectric structure for microwave lens prototyping," 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2017, pp. 294-296, doi: 10.1109/ICATT.2017.7972647.
7. N. A. Lysenko, A. M. Bobreshov, **N. S. Sbitnev**, G. K. Uskov and S. P. Skulkin, "Accuracy of the pulse characteristic calculation method for circular plane aperture transient field analysis," 2019 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC), 2019, pp. 36-39, doi: 10.1109/ADMInC47948.2019.8969346.
8. A. Bobreshov, G. Uskov, K. Smuseva and **N. Sbitnev**, "Experimental Study of the Characteristics of Ultrawideband TEM Horn with the Dielectric Filling," 2020 7th

All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020, pp. 189-191, doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312282.

Материалы конференций, статьи в сборниках, индексируемых в РИНЦ

9. Бобрешов А.М. Улучшение направленных свойств ТЕМ – рупора путем использования неоднородного диэлектрического заполнения / А.М.Бобрешов, Г.К. Усков, П.А. Кретов, **Н.С. Сбитнев** // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова. Серия «Научные конференции, посвящённая Дню радио» (выпуск LXXI). 25–27 мая 2016 г., Москва. — 2016. — С. 150–154.
10. Бобрешов А.М. Влияние неоднородного диэлектрического заполнения на направленные свойства ТЕМ-рупора / А.М. Бобрешов, П.А. Кретов, **Н.С. Сбитнев**, Г.К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 19-21 апр. 2016 г. — Воронеж, 2016. — Т. 2. - С. 946-952.
11. Синтез неоднородной диэлектрической структуры для улучшения характеристик антенны Вивальди / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. С. Сбитнев**, Г. К. Усков. – Радиолокация, навигация, связь: XXIII Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 18 – 20 апр. 2017 г. – Воронеж, 2017. – Т. 3. – С. 1108 – 1112.
12. Многолучевая ТЕМ-рупорная антенна с формированием направления линзой Люнеберга / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, П. А. Кретов, Н. А. Лысенко, **Н. С. Сбитнев** // Радиолокация, навигация, связь : 24-я Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 17-19 апр. 2018 г. — Воронеж, 2018. — Т. 4. - С. 143-149. — 0,4 п.л.
13. Исследование диэлектриков для трехмерной печати микроволновых линз / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, В. А. Степкин, **Н. С. Сбитнев**, Г. К. Усков. - Радиолокация, навигация, связь: XXIV Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 17 – 19 апр. 2018г. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 58 – 63.
14. Применение диэлектрического заполнением для управления формой диаграммы направленности антенны / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, К. В. Смусева, **Н. С. Сбитнев** // Радиолокация, навигация, связь: 25-я Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 16-18 апр. 2019 г.: сборник трудов. — Воронеж, 2019. — Т. 5. - С. 24-30.— 0,4 п.л.
15. Экспериментальное исследование характеристик сверхширокополосного тем рупора с диэлектрическим заполнением / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, К. В. Смусева, **Н. С. Сбитнев** // Радиолокация, навигация, связь: XXVI Международная научно-техническая конференция, г. Воронеж, 29 сентября - 1 октября 2020 г.: сборник трудов.— Воронеж, 2020. — Т. 5. - С. 259-263. — 0,3 п.л.
16. Экспериментальное исследование характеристик сверхширокополосного ТЕМ-рупора с диэлектрическим заполнением / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, К. В. Смусева, **Н. С. Сбитнев** // VII Всероссийская микроволновая конференция, Москва, 25-27 ноября 2020 г.: сборник трудов.— Москва, 2020. — С. 232-235. — 0,3 п.л.

17. Исследование характеристик ТЕМ-рупорных антенн при различных размерах апертуры / А. М. Бобрешов, А. И. Пикус, **Н. С. Сбитнев**, К. В. Смусева, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. В 4-х томах. Воронеж, 2021. С. 249-253.