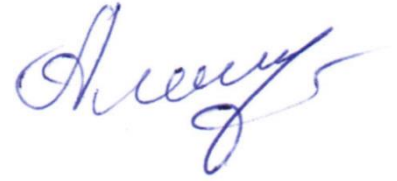


На правах рукописи



Александрин Антон Михайлович

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СТРУКТУР ИЗ ИСКУССТВЕННОГО НЕОДНОРОДНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Научный руководитель: **Саломатов Юрий Петрович**, кандидат технических наук, профессор, СФУ, г. Красноярск

Официальные оппоненты: **Калошин Вадим Анатольевич**, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией электродинамики композиционных сред и структур ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», г. Москва;

Балзовский Евгений Владимирович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории высокочастотной электроники ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН», г. Томск

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Вектор», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 29 сентября 2020 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/ofhgw5h8>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.268.01
доктор физико-математических наук



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью диссертационной работы является исследование неоднородной цилиндрической линзовой антенны из однородных диэлектрических материалов, направленное на создание компактной широкополосной АР.

Объектом исследования является неоднородная цилиндрическая линзовая антенна, **предметом исследования** является реализация компактной широкополосной АР с использованием линз из неоднородного диэлектрика (ЛНД).

Задачи диссертационного исследования:

- 1) определение потенциально достижимых характеристик линзовых антенн для использования в составе широкополосных АР;
- 2) разработка и исследование характеристик ЛНД;
- 3) исследование возможностей эффективного сопряжения ЛНД с облучателями различных типов;
- 4) исследование способов построения широкополосных АР с применением ЛНД.

Актуальность проблемы.

В настоящее время происходит интенсивное освоение миллиметрового диапазона длин волн, направленное на увеличение пропускной способности каналов передачи информации, развитие широкополосных средств связи и радиолокации. Активно развиваются программы широкополосного доступа в Интернет в *Ka*-диапазоне. Расширяется необходимость в использовании широкополосных средств радиомониторинга и радиоизмерений. Эффективность таких систем не в последнюю очередь определяется используемыми антеннами.

Широкое распространение данных систем предъявляет определённые требования к их антенным устройствам, которые должны быть широкополосными, компактными, позволять лёгкий монтаж и развёртывание, иметь низкую стоимость. Требования компактности, широкой полосы частот и высокой направленности в известной мере противоречивы:

- широкополосные узконаправленные антенны на основе зеркал и линз имеют выносные элементы и соответственно, значительные продольные размеры;

- компактные антенные решётки (АР), выполняемые по печатной технологии, работают, как правило, в узкой полосе частот и зачастую имеют очень сложную диаграммообразующую схему, затрудняющую согласование в широкой полосе частот;

- некоторые типы широкополосных и компактных антенн (например, логопериодические) удовлетворяя вышеописанным требованиям, не обеспечивают, высокой направленности.

Для решения вышеописанных проблем предлагается использование АР, содержащих дополнительные фокусирующие элементы из искусственного неоднородного диэлектрика. Указанные элементы представляют собой линзы, с помощью которых достигается сужение ДН антенного элемента решётки и таким образом обеспечивается работа АР в широкой полосе частот за счёт эффективного подавления дифракционных лепестков.

Всё вышеизложенное обуславливает **актуальность** работ, связанных с исследованием методов создания широкополосных направленных антенн с использованием искусственного неоднородного диэлектрика, обладающих компактными размерами.

Методы исследования.

В ходе работы применялось электродинамическое моделирование излучающих структур различными методами (FDTD, FIT, MoM) в прикладных программных пакетах. Для расчёта структур из неоднородного диэлектрика использовался аналитический метод расчета, основанный на методе разложения по плоским волнам (PWE). Экспериментальные исследования проводились методами измерений характеристик на векторном анализаторе цепей, характери-

стики излучения антенн исследовались в безэховых камерах методом сканирования ближнего поля, а также измерениями в дальней зоне.

Научная новизна.

В работе получены следующие новые результаты:

1) Предложен простой метод реализации радиально-неоднородного искусственного диэлектрика, позволяющий изготавливать линзовые антенны на его основе (получен патент РФ);

2) Предложен метод создания широкополосных АР с гибридной ДОС, использующий структуры из искусственного неоднородного диэлектрика и позволяющий обеспечить работу АР в широкой полосе частот, достичь высоких значений КИП при компактной плоской форме антенной системы.

3) Обнаружен эффект периодической зависимости КИП ЛНД от ширины диэлектрической оправы, в которой размещена линза. Установлено, что период данной зависимости определяется значением диэлектрической проницаемости материала оправы и не зависит от радиуса и материала линзы.

4) Установлена гиперболическая зависимость положения максимума КИП от диэлектрической проницаемости материала оправы ЛНД.

Практическая значимость.

1. Предложен простой и эффективный способ создания радиально-неоднородного диэлектрика. Простота метода заключается в том, что он позволяет изготавливать неоднородный диэлектрик путём набора его из тонких слоёв однородного диэлектрика, вырезанных специальным образом. Операция вырезки осуществляется за один проход простой операцией, например, лазерной резкой или штамповкой;

2. Предложена конструкция линзы с диэлектрической оправой, в которой отсутствует ухудшение КИП за счёт резонансных эффектов в оправе, что достигается выбором необходимой ширины оправы.

3. Одиночная линза с облучателем может быть использована в качестве самостоятельной антенной системы при небольших продольных размерах и отсутствии фазовых искажений в раскрыве;

4. Предложен способ построения апертурных антенн и АР с гибридной ДОС, обладающих высокой направленностью, компактностью и широкополосностью, что может быть использовано в антеннах для широкополосных систем связи и радиомониторинга.

Достоверность результатов, основывается на корректном применении численных и аналитических методов, на использовании современных САПР, апробированных экспериментальных методик и высокоточного оборудования. Результаты работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдается количественное и качественно совпадения результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

Внедрение результатов исследований.

Результаты исследований были применены в ходе выполнения НИР и ОКР «Горизонт» (2012—2013 гг.), НИР «Исследование и разработка широкополосных антенных решёток для спутниковой связи и использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика» (2011—2012 гг.), проводимой в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009—2013 гг.), ОКР «Квартет» (2016 г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на конференциях «Актуальные проблемы радиофизики (Томск, 2010, 2012) «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2011, 2012), СПбНТОРЭС, посвящённой дню радио (Санкт-Петербург, 2012), Микроэлектроника СВЧ (Санкт-Петербург, 2012) IEEE Sibcon (Красноярск, 2013, Москва 2016),

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 9 статьях и материалах конференций, среди которых 6 публикаций в изданиях из перечня ВАК. Конструкция цилиндрической линзы защищена патентом на изобретение.

Личное участие автора в получении результатов

Основные исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, были выполнены автором лично. Совместно с научным руководителем предложена структура цилиндрической линзы из искусственного неоднородного диэлектрика, обсуждались цели и задачи исследований, а также результаты работы. Личный вклад автора включает: создание программ для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости неоднородного диэлектрика методом разложения по плоским волнам, разработку моделей для электродинамического расчета в САПР как параметров профильной слоистой среды, так и ЛНД, выполнение исследований зависимости характеристик ЛНД от параметров пространственной дискретизации профиля цилиндрической ЛНД, выполнение экспериментальных исследований и обработку экспериментальных данных.

Защищаемые научные положения.

1) Характеристики цилиндрической линзы, состоящей из коаксиального набора плоских слоёв однородного диэлектрика звездообразной формы, уложенных с чередованием направления лепестков, соответствуют характеристикам линзы Микаэляна, при условии выбора формы лепестков, их толщин и количества таким образом, чтобы обеспечить аналогичное распределение эффективной диэлектрической проницаемости.

2) При наличии диэлектрической оправы КИП ЛНД периодически зависит от ширины оправы, при этом период имеет гиперболическую зависимость от диэлектрической проницаемости материала оправы.

3) Использование цилиндрических линз из искусственного неоднородного диэлектрика в составе АР в качестве фокусирующего дополнения к каждому её элементу позволяет уменьшить количество элементов плоской АР в 4—16 раз при октавной полосе частот, не ухудшая характеристик направленности, при этом максимальная толщина АР составляет не более $2\lambda_{\min}$.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы. Объём диссертации составляет 149 страниц, количество иллюстраций 155, число цитированных источников 72.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведены обоснование актуальности темы, постановка проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены защищаемые положения, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены литературные источники по теме исследования. Кратко рассмотрены основные параметры известных типов широкополосных антенн и АР. Приведён обзор основных способов реализации неоднородных сред, указаны их достоинства и недостатки.

По результатам обзора сделаны следующие выводы:

1) Большинство известных типов широкополосных-антенн (ШП-антенн) не позволяет достичь одновременно малой толщины и высокой направленности.

2) АР на основе связанных излучателей позволяют достичь широкой полосы частот, но требуют сложной схемы питания. В литературе проблема создания диаграммообразующих схем (ДОС) для антенн подобного типа практически не решена.

3) АР на основе неэквилибрантного расположения элементов может работать в широкой полосе частот, однако также требует весьма сложной ДОС, а главное, такая АР имеет весьма низкий КИП. Кроме того, проблема синтеза таких систем сопряжена со значительными вычислительными трудностями.

4) Основные недостатки большинства методов создания неоднородного диэлектрика заключаются в том, что они не позволяют достичь единичного показателя преломления, либо сложны технологически.

Также в первой главе рассматриваются диэлектрические линзы различных типов с целью сравнения их по критериям минимальных продольных размеров и предельно достижимого КИП. Сравняются однородные линзы с одной преломляющей поверхностью (гиперболическая и эллиптическая) и неоднородные линзы Люнеберга, Максвелла и Микаэляна. Установлено, что наименьшую толщину антенной системы с облучателем при условии высокого КИП обеспечивают линзы Максвелла и Микаэляна. Сделан вывод, что линза Микаэляна является наиболее предпочтительной при практической реализации линзовых антенн для АР. В третьей главе проводится исследование структур искусственного неоднородного диэлектрика, предназначенных для применения в составе АР.

Во второй главе проводится исследование структур искусственного неоднородного диэлектрика, предназначенных для применения в составе АР.

Предложен способ создания радиально-неоднородного диэлектрика, заключающийся в замене неоднородной среды набором тонких звездообразных слоёв однородного диэлектрика (рис. 1). При создании цилиндрической линзы отдельные слои укладываются друг на друга с чередованием направления «лепестков» (рис. 2).

Было получено выражение, описывающее форму «лепестка» в полярных координатах, для получения закона изменения эффективной диэлектрической проницаемости, соответствующего линзе Микаэляна:

$$\varphi(r) = \pm \frac{2\pi}{N(\varepsilon_1 - 1)} \left(\frac{\varepsilon_1}{\operatorname{ch}^2(r \operatorname{Arch}(\sqrt{\varepsilon_1})/r_0)} - 1 \right), \quad (1)$$

где ε_1 — диэлектрическая проницаемость материала линзы, r_0 — радиус линзы, N — количество «лепестков» в элементарном слое.

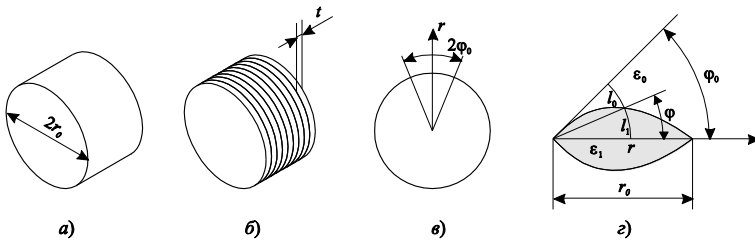


Рис. 1 — Способ дискретизации непрерывной неоднородной среды: а) —исходная цилиндрическая линза, б) — разбиение цилиндра на элементарные слои, в) — разбиение слоя на секторы г) —частичное заполнение сектора диэлектриком

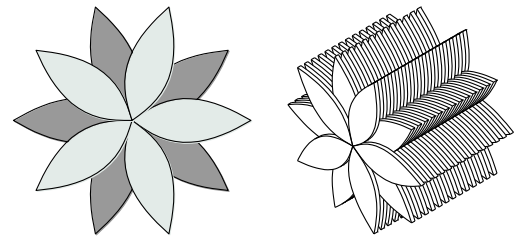


Рис. 2 — Пятилучевая ЛНД

Для уточнения формы «лепестка» было предложено рассмотрение его структуры в виде двумерного фотонного кристалла (ФК), методом PWE. В результате расчёта получено семейство графиков двумерной функции $\varepsilon_{\text{эф}}(f, c_a)$, где $\varepsilon_{\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость, f — частота, c_a — коэффициент заполнения среды (рис 3, 4).

По полученным графикам уточняется форма «лепестка», устанавливаются максимальные частоты, на которых возможна работа линзы.

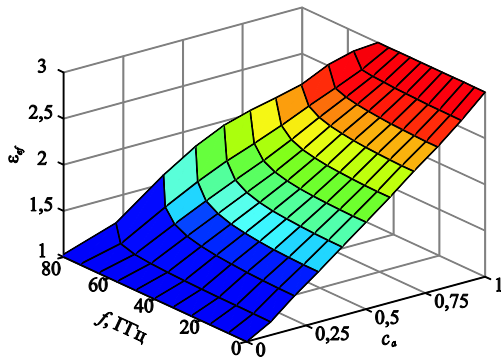


Рис. 3 — Пример зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ФК от частоты и коэффициента заполнения при *TE*-поляризации падающей волны

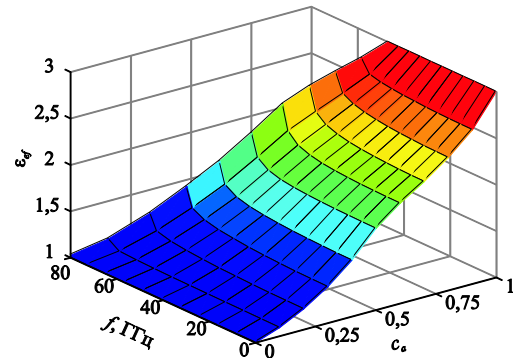


Рис. 4 — Пример зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ФК от частоты и коэффициента заполнения при *TM*-поляризации падающей волны

Проведено численное моделирование предложенной структуры в программе CST Studio Suite с целью установить, каковы предельные параметры

разбиения ЛНД на слои и лепестки, которые при минимальном их количестве обеспечивают максимально возможный КИП. Исследование проводилось для разных значений толщин элементарных слоёв и для различного способа их укладки в целой линзе. Установлено, что для достижения максимального КИП достаточно, чтобы расстояние между концами «лепестков» было порядка 1,5 длины волны. Также установлено, что наилучшее значение толщины элементарных слоёв равно 0,15 длины волны в диэлектрике.

В третьей главе рассматривается ЛНД с оправой из сплошного однородного диэлектрика. Оправа предназначена для удержания отдельных лепестков за их концы и придаёт конструкции жесткость, а также позволяет разместить на ней крепёжные элементы (рис. 6). Рассмотрены вопросы влияния наличия оправы на характеристики ЛНД.

На рис. 7 показана зависимость апертурного КИП от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике $L_{\text{опр}}/\lambda_{\epsilon_0}$ (ширина цилиндрической оправы — разность между внутренним и внешним радиусами цилиндра) для радиуса ЛНД, равного 2λ и ϵ_0 , равного 3. Диэлектрическая проницаемость оправы ϵ_0 равна значению ϵ_0 в центре ЛНД. В качестве облучателя в данной конфигурации применялся открытый конец круглого волновода, заполненного диэлектриком с проницаемостью ϵ_0 .

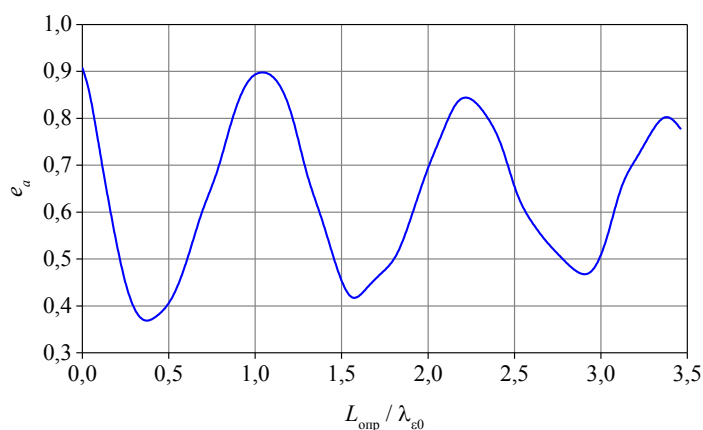
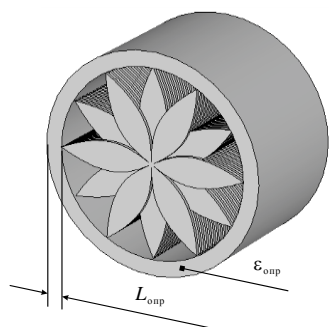


Рис. 5. Линза с цилиндрической оправой

Рис. 6 — Зависимость апертурного КИП (e_a) линзы радиуса 2λ от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике.

Из рисунка 6 видно, что зависимость КИП от ширины оправы носит периодический характер. При малых ширинах оправы КИП снижается, затем возрастает практически до исходного значения. Последующие максимумы КИП уменьшаются по уровню. При изготовлении ЛНД с оправой ширина оправы должна соответствовать второму максимуму КИП, которому на рис. 6 соответствует электрическая ширина, равная длине волны в материале оправы λ_{ϵ_0} .

Для разных значений проницаемости материала оправы $\epsilon_{\text{опр}}$ электрическая ширина оправы $L_{\text{опр}}/\lambda_{\epsilon_{\text{опр}}}$, соответствующая максимуму КИП, будет различаться. На рис. 8 приведена зависимость электрической ширины оправы, усреднённой по различным радиусам линзы от $1\lambda_0$ до $3\lambda_0$ для второго максимума КИП от $\epsilon_{\text{опр}}$.

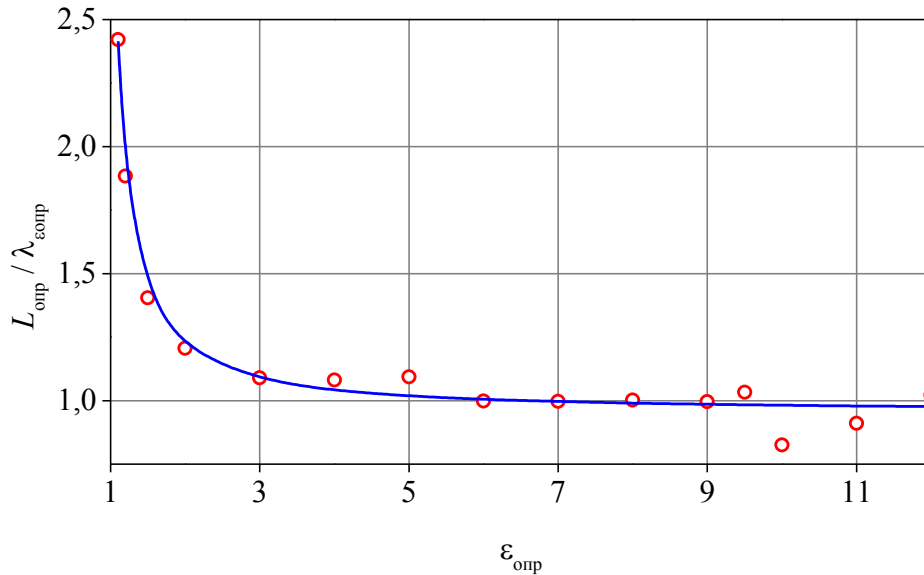


Рис. 7 — Зависимость усреднённой электрической толщины оправы для второго максимума КИП от значения диэлектрической проницаемости оправы ($\epsilon_{\text{опр}}$)

Как можно видеть, данная зависимость хорошо аппроксимируется гиперболической функцией:

$$L_{\text{опр}}/\lambda_{\text{эопр}}(\varepsilon_{\text{опр}}) \approx \frac{0,268}{\varepsilon_{\text{опр}} - 0,917} + 0,952.$$

В четвёртой главе приведены результаты исследований излучателей АР с использованием линз из искусственного неоднородного диэлектрика. При помощи численного моделирования проведено сравнение некоторых типов облучателей, способных работать с линзой в широкой полосе частот. Среди них широкополосный вибратор-«бабочка», «бабочка» с короткозамыкающими шлейфами, плоские логопериодические и спиральные антенны.

В ходе исследования установлено, что необходимыми характеристиками согласования и направленности обладают печатные излучатели на основе частотно-независимых структур, например, вибратор-«бабочка», питаемый двухпроводной полосковой линией. Такой тип питания позволяет обойтись без дополнительных элементов подвода мощности, ухудшающих согласование (штырей, сквозных металлизированных отверстий и т. п.). Такой вибратор, расположенный над проводящим экраном, может обеспечить работу в октавной полосе частот без существенного ухудшения характеристик.

При сопряжении излучателя с ЛНД характеристики согласования меняются. Это связано с отражениями волны от торцевых поверхностей линз. Помимо ухудшения согласования этот эффект приводит к осцилляциям КНД и КИП в диапазоне частот. В полосе частот, не превышающей октаву, эффект может быть ослаблен применением в линзе просветляющих слоёв толщиной в четверть длины волны. Однако улучшить согласование можно и простым увеличением толщины линзы, если использовать для её изготовления материал с более низким показателем преломления.

Фокусирующие свойства ЛНД, набранной из тонких фигурных слоёв, были подтверждены экспериментально при помощи макета излучателя (рис. 14). Излучатель согласован в полосе частот 12—24 ГГц и имеет узкую ДН (рис 15, 16). Диаметр линзы составляет 60 мм, что равно $4,8\lambda$ на частоте 24 ГГц. Из гра-

фиков видно, что ЛНД осуществляет фокусировку волны, излучаемой вибратором, т. е. формирует плоский фазовый фронт в апертуре.

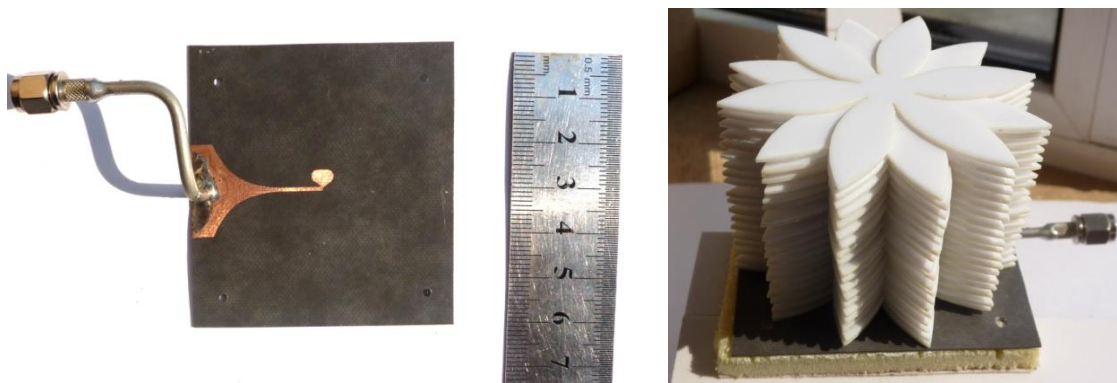


Рис. 8. — Экспериментальный макет излучателя диапазона 12—24ГГц.

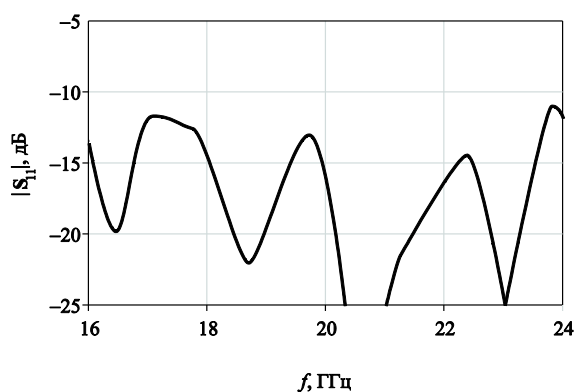


Рис. 9. — Коэффициент отражения макета широкополосного печатного вибратора с ЛНД

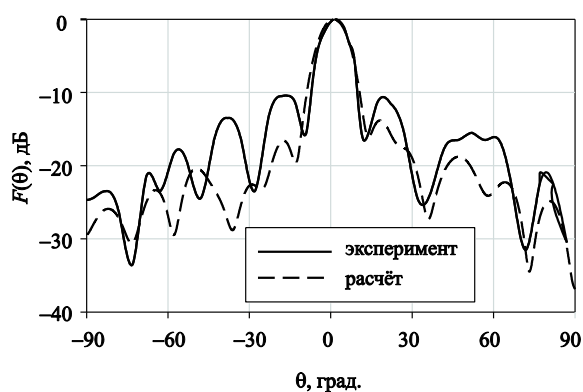


Рис. 10. — ДН макета широкополосного печатного вибратора с ЛНД на частоте 24 ГГц (пл. *E*)

В пятой главе приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований различных конфигураций АР. На рис 17 показана модель АР с гексагональным расположением элементов и фокусирующим слоем из ЛНД. В качестве излучателя использовался широкополосный вибратор-«бабочка», ДОС на основе печатных двухпроводных линий выполнена на той же подложке, что и излучатели и представляет собой двоично-этажную схему.

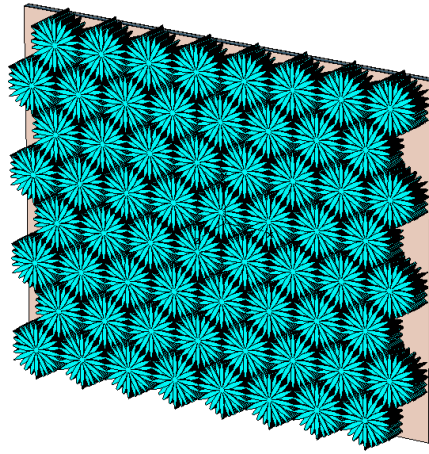


Рис. 11 — Общий вид модели АР с ЛНД

Модель АР с линзами исследовалась в двух конфигурациях: с полностью полосковой ДОС и с гибридной ДОС. Последняя представляет собой соединение волноводного делителя на 4 и четырёх подрешёток, выполненных по печатной технологии. Применение гибридной ДОС позволяет снизить потери в печатных двухпроводных линиях, которые достигают больших значений на высоких частотах (в рассматриваемом случае порядка 8 дБ/м). Для сопряжения прямоугольного волновода с печатной двухпроводной линией был разработан специальный переход.

На рис. 19 приведены расчётные коэффициенты отражения от входных портов для АР с ЛНД с полосковой и гибридной ДОС.

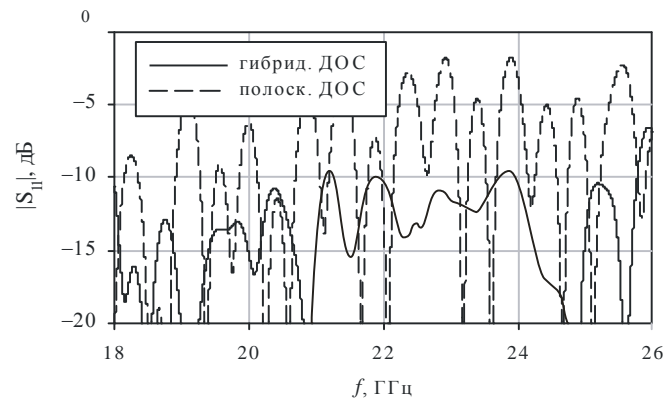


Рис. 12 — Коэффициенты отражения АР с двухпроводной полосковой и гибридной ДОС

На рис. 18 приведены графики КИП для двух типов ДОС: полностью двухпроводной и гибридной.

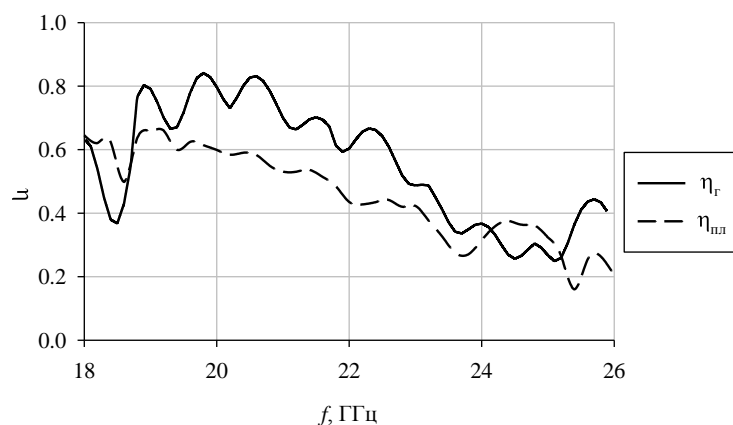


Рис. 13 — Апертурные КИП АР с двухпроводной полосковой и гибридной ДОС

По результатам расчётов и численного моделирования можно сделать вывод о том, что применение ЛНД в составе широкополосной АР позволяет обеспечить высокий апертурный КИП в широкой полосе частот, а применение гибридной ДОС — улучшить согласование и снизить потери.

Экспериментально исследована АР 8×8 с гексагональным расположением элементов (рис. 20, 21). Рабочая полоса частот соответствует Ka -диапазону и равна 18—26 ГГц. Расстояние между излучателями равно 37,5 мм ($3,25\lambda_{\min}$). В АР применена гибридная схема деления мощности, в которой первые две ступени деления выполнены на основе волноводной линии передачи.

Фокусирующий слой имеет толщину 20 мм ($1,7\lambda_{\min}$) и образован 20 слоями листового полиэтилентерефталата, причём каждый из тонких слоёв всей АР изготовлен в виде цельного листа с фигурными прорезями. В дальнейшем отдельные листы соединяются винтами по периметру оправы (см. рис 20). Общая толщина системы без конструктивных элементов составила 27 мм ($2,34\lambda_{\min}$)

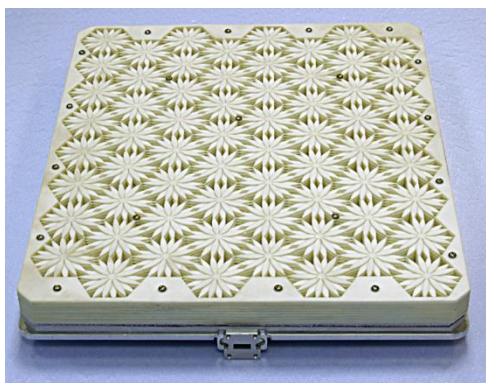


Рис. 14. — Экспериментальный макет АР

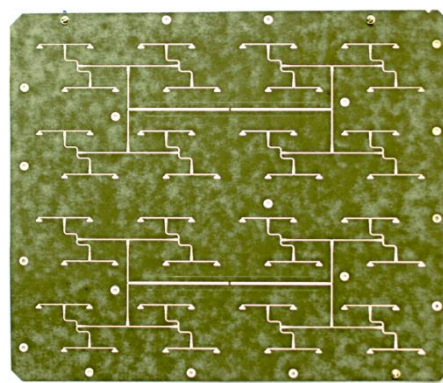


Рис. 15. — Топология печатной платы АР

Экспериментальное исследование характеристик направленности АР проводилось в безэховой камере методом сканирования ближнего поля антенны.

Эксперименты подтвердили, что АР, изготовленная с применением ЛНД, имеет низкий уровень дифракционных лепестков в широкой полосе частот, не превышающий уровня первого бокового лепестка (рис. 22). С ростом частоты уровень дифракционных лепестков растёт, вплотную приближаясь к уровню бокового лепестка, за счёт этого эффекта происходит падение апертурного КИП в полосе частот (рис. 23) На рис. 23 также приведён график КПД η , который измерялся как отношение КУ к КНД, вычисленному по измеренным ДН.

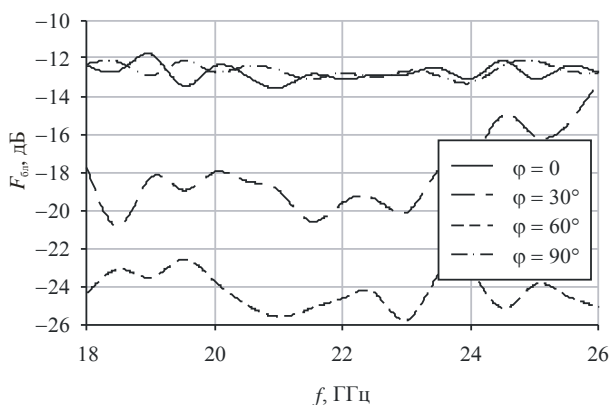


Рис. 16. — УБЛ АР в четырёх сечениях трёхмерной ДН

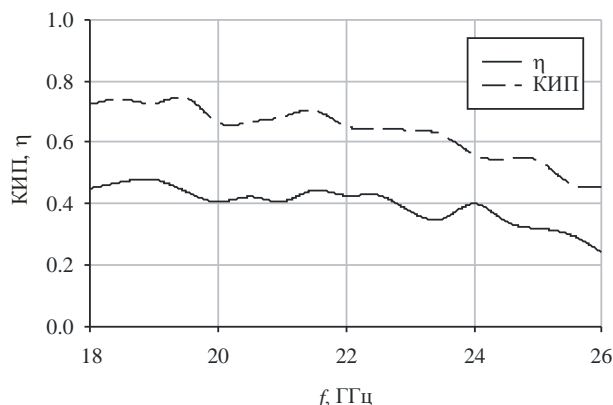


Рис. 17. — КПД и апертурный КИП антенны

В целом эксперименты подтвердили данные расчётов и моделирования, продемонстрировали работу макета АР в широкой полосе частот при высоких значениях КИП.

В заключении изложены основные научные и практические результаты работы

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Предложен технологически простой способ реализации радиально-неоднородного искусственного диэлектрика, позволяющий изготавливать ЛНД.

2. Предложены методы расчёта характеристик предложенной структуры искусственного неоднородного диэлектрика.

3. Разработаны и исследованы конструкции АР на основе ЛНД, изготавливаемых с помощью предложенного способа. Численными расчётами установлены границы применимости предложенного метода, выяснены предельные конструктивные параметры ЛНД, обеспечивающие хорошее приближение к её теоретической модели.

4. Изготовлены макеты широкополосных АР, содержащих антенные элементы в виде ЛНД. Проведены исследования различных типов широкополосных излучателей, пригодных для применения в таких АР.

5. Теоретические выводы и численные расчёты подтверждены экспериментальными исследованиями макетов антенных систем.

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. Александрин А. М. Исследование квазиоптических структур из искусственного диэлектрика в СВЧ-диапазоне / А. М. Александрин, Р. О. Рязанцев, Ю. П. Саломатов // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического унив. им. ак. М. Ф. Решетнёва, выпуск 6 (32), 2010. С. 15—18.

2. Александрин А. М. Широкополосная антенная решётка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 7–10.

3. Александрин А. М. Построение плоских апертурных антенн с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического унив. им. ак. М. Ф. Решетнёва, выпуск 6 (46), 2012. С. 8—10

4. Александрин А. М. Реализация радиально-неоднородного диэлектрика и создание апертурных антенн на его основе [электронный ресурс]/ Александрин А. М., Гафаров Е. Р., Лемберг К. В., Панько В. С., Поленга С. В., Рязанцев Р. О., Саломатов Ю. П. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-10789

5. Александрин А. М. Влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика / А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 7–11.

6. Александрин А. М. Экспериментальное исследование широкополосной антенной решетки К-диапазона с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. X–X.

ПАТЕНТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

7. Цилиндрическая линза: пат. 2504056 Российская Федерация: МПК Н01Q 15/08 19/08 / Александрин А. М., Саломатов Ю. П.; патентообладатель СФУ (RU) № 2012126433/08; заявл. 25.06.2012; опубл. 10.01.2014 Бюл. №1

ПРОЧИЕ ПУБЛИКАЦИИ

8. Александрин А. М. Влияние параметров облучателей на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика / А. М. Александрин, Р.

О. Рязанцев, Ю. П. Саломатов // Изв. вузов. Физика. Издание Томского Государственного Университета – 2012. – 9/2. – С. 93-94

9. Александрин А. М. Линза из неоднородного диэлектрика [электронный ресурс] // Сборник докладов конференции «Микроэлектроника СВЧ» 2012. URL:<http://mwelectronics.ru/2012/index.html>

10. Александрин А. М. Плоская гибридная антенная решётка проходного типа. / А. М. Александрин, Ю. П. Саломатов // Труды 67-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио. 12—27 апреля 2012 г., Санкт-Петербургская организация «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова» (СПб НТОРЭС), с.14—15.

11. A. M. Alexandrin. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.

12. Alexandrin A. M. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens / A. M. Alexandrin, R. O. Ryazantsev ; Y. P. Salomatov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings. 14 June 2016, Article number 7491859