

На правах рукописи



ЧАН ТИЕН ТХАНГ
МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ НА БАЗЕ ГРАДИЕНТНЫХ И
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЛИНЗ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Долгопрудный – 2023

Работа выполнена на кафедре радиотехники и систем ФРКТ ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель **Калошин Вадим Анатольевич**, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты **Пастернак Юрий Геннадьевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Семерня Екатерина Игоревна, кандидат физико-математических наук, инженер ООО «Исследовательский центр САМСУНГ»

Ведущая организация **ПАО «Радиофизика».**

Защита состоится «29» сентября 2023 г., в 11-00, на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте:

<http://cplire.ru/rus/dissertations/Thang/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Кузьмин
Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время возрос интерес к использованию многолучевых антенн на основе линз с центральной симметрией. Интерес связан, с одной стороны, с новыми технологическими возможностями изготовления градиентных линз, в первую очередь за счет использования 3D печати, а с другой – с потенциальными возможностями использования многолучевых линзовых антенн в системах радиолокации и связи новых поколений. При этом многолучевые антенны на основе линз с центральной и осевой симметрией наиболее перспективны для таких приложений из-за больших углов обзора, связанных с отсутствием аберраций при размещении облучателей вдоль фокальной сферы (в случае центральной симметрии) или окружности (в случае осевой симметрии).

Несмотря на большое количество работ, посвященных градиентным диэлектрическим линзам с центральной и осевой симметрией, общее решение синтеза таких линз с оболочкой, произвольным положением фокуса и формы диаграммы направленности в литературе отсутствует.

Аналогичная ситуация имеет место и в случае геодезических линз с осевой симметрией. Задача синтеза такой линзы заключается в нахождении формы образующих двух параллельных криволинейных металлических поверхностей или слоя диэлектрика, обеспечивающих преобразование цилиндрической волны источника в планарном волноводе в основную моду планарного волновода с заданным двумерным фазовым фронтом.

Многолучевые антенны на основе линз с осевой и центральной симметрией, несмотря на их потенциальные возможности, не могут обеспечить полный азимутальный угол обзора из-за затенения апертуры антенны облучающей системой, в связи с чем для этого обычно используются три или более антенн.

Полный азимутальный угол обзора могут обеспечить многолучевые антенны на основе тороидальных линз, однако они не могут обеспечить высокие

значения коэффициента использования поверхности (КИП).

Таким образом, является актуальным получение общего решения задачи синтеза градиентных диэлектрических и геодезических линз с осевой симметрией и разработки на их основе многолучевых антенн с полным азимутальным углом обзора.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является решение задачи синтеза градиентных диэлектрических и геодезических линз с осевой симметрией в общей постановке и разработки на их основе многолучевых антенн с полным азимутальным углом обзора.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Решения задачи синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией в общей постановке.
2. Решения задачи синтеза цилиндрической многослойной градиентной металлодиэлектрической линзы с осевой симметрией.
3. Решения задачи синтеза металлических и металлодиэлектрических геодезических линз с осевой симметрией и плавным переходом в общей постановке.
4. Решения задачи синтеза цилиндрической многослойной металлодиэлектрической геодезической линзы с осевой симметрией.
5. Разработки и исследования многолучевых антенн на основе градиентных и геодезических многослойных цилиндрических металлодиэлектрических линз с осевой симметрией.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы: метод геометрической оптики, приближение Кирхгофа, метод конечных элементов (МКЭ).

Новые научные результаты. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Получено решение задачи синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией, оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса вне или на поверхности линзы.

2. Получено решение задачи синтеза цилиндрической многослойной градиентной металлодиэлектрической линзы с осевой симметрией.

3. Получено решение задачи синтеза металлических и металлодиэлектрических геодезических линз с осевой симметрией и плавным переходом, оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса.

4. Получено решение задачи синтеза цилиндрической многослойной металлодиэлектрической геодезической линзы с осевой симметрией.

5. Разработаны и исследованы многолучевые антенны на основе градиентных и геодезических многослойных цилиндрических металлодиэлектрических линз с осевой симметрией.

Практическая значимость работы. Разработанные и исследованные многолучевые антенны на основе градиентных и геодезических многослойных цилиндрических металлодиэлектрических линз с осевой симметрией могут найти практическое применение в качестве базовых станций мобильной связи новых поколений, систем радиолокации и радиомониторинга.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Полученное общее решение задачи синтеза геодезической линзы с осевой симметрией обобщает все известные решения.

2. Полученное общее решение задачи синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией обобщает все известные решения для фокуса вне или на поверхности линзы.

3. Разработанные многолучевые антенны на основе многослойных металлодиэлектрических градиентных и геодезических цилиндрических линз с осевой симметрией обеспечивают полный азимутальный угол обзора без затенения облучающей системой.

Достоверность результатов обеспечена использованием апробированных методов численного моделирования, а также сопоставлением результатов моделирования.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на 8 Всероссийской микроволновой конференции «2022 IEEE 8th All-Russian

Microwave Conference (RMC)» Moscow, 2022 и 55 Всероссийской конференции, «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (РЭУС-ИТ 2023)», Москва, 2023.

Публикации. Результаты работы изложены в 6 трудах, в том числе 4 в научных статьях, опубликованных в журнале, входящих в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, 1 - в журнале, входящим в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 - в трудах Всероссийской конференции, входящей в базу Scopus. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 53 страницы.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: разработка и исследование многолучевых антенн на основе градиентных и геодезических многослойных цилиндрических металлодиэлектрических линз с осевой симметрией, остальные результаты (решение двумерной задачи синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией с оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса, решение задачи синтеза цилиндрической многослойной градиентной металлодиэлектрической линзы с осевой симметрией, решение задачи синтеза металлических и металлодиэлектрических геодезических линз с осевой симметрией и плавным переходом, оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса, решение задачи синтеза цилиндрической многослойной металлодиэлектрической геодезической линзы с осевой симметрией) получены совместно с А.С. Венецким и В.А. Калошиным.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения об апробации работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе решена задача синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией в общей постановке, на основе которой разработана многолучевая планарная антенна с П-образной формой диаграммы

направленности (ДН) лучей в азимутальной плоскости.

В разделе 1.1 в приближении геометрической оптики решена задача синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией и оболочкой, которая преобразует поле точечного источника, расположенного в фокусе вне линзы или на ее поверхности в заданное геометрооптическое поле (с заданным законом $\psi(\varphi)$, рис. 1а).

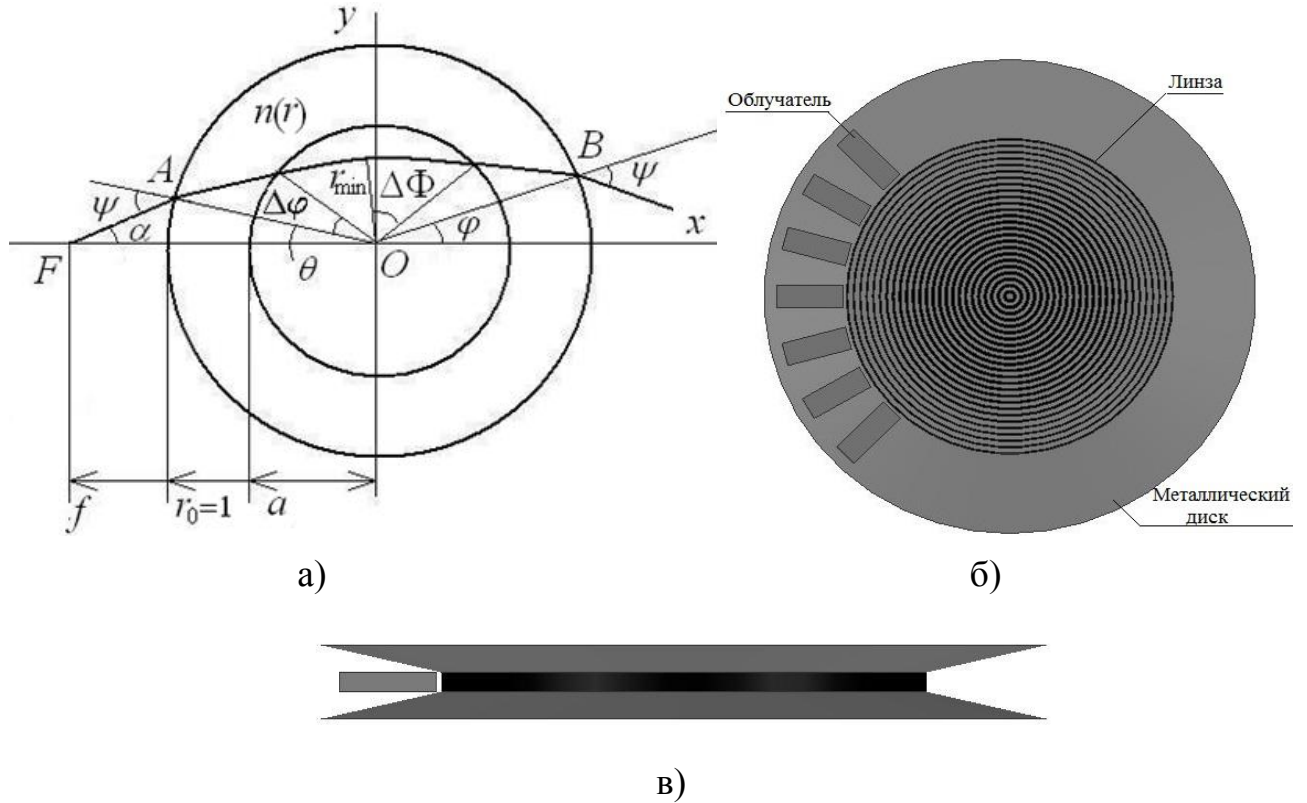


Рис. 1. Многолучевая планарная антенна: а) геометрия луча, б) сечение линзовой антенны, в) вид линзовой антенны сбоку

Задача синтеза сведена к интегральному уравнению типа Абеля, в результате решения которого найден закон изменения коэффициента преломления от радиуса $n(r)$ в параметрической форме

$$n(\rho) = \frac{1}{a} \exp\left(\frac{1}{2} \ln(1 + \sqrt{1 - \rho^2})\right) + \frac{1}{\pi} \int_{\rho}^1 \frac{\arcsin(h/f)}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} dh - \frac{2}{\pi} \int_a^1 \arctg\left(\sqrt{\frac{1 - \rho^2}{n_1^2(r)r^2 - 1}}\right) \frac{dr}{r} - \frac{1}{\pi} \int_{\rho}^1 \frac{\varphi(\psi) dh}{\sqrt{h^2 - \rho^2}}, \quad (1)$$

где $r(\rho) = \rho / n(\rho)$, $0 \leq \rho \leq 1$, $n_1(r)$ - коэффициент преломления в оболочке, a – ее внутренний радиус, ψ – угловая координата точки на поверхности линзы, φ – угол

выхода луча из линзы, радиус который при решении задачи синтеза без ограничения общности полагаем равным 1 и при этом должно удовлетворяться условие

$$\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{1}{f} - \frac{1}{2} \varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) \geq \int_a^1 \frac{dr}{r \sqrt{P^2(r) - 1}} \quad (2)$$

В разделе 1.2 развита методика геометрикооптического синтеза антенны с заданной амплитудной диаграммой направленности (ДН) луча на основе градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией и оболочкой. Построена электродинамическая модель планарной линзовой антенны в виде набора концентрических диэлектрических колец, расположенных внутри планарного волновода, образованного двумя металлическими дисками (рис. 1б). Для уменьшения отражения и увеличения коэффициента усиления (КУ) диски дополнены биконическими рупорами (рис. 1в).

Для определения размеров колец получена приближенная формула

$$c(r) = c_0(r) + \frac{(k_0 d)^2 c_0^2 (1 - c_0)^2 (\varepsilon_d - \varepsilon_0)}{12} \quad (3)$$

где $c(r) = t(r)/d$ – коэффициент заполнения, $t(r)$ – толщина колец в зависимости от их среднего радиуса, d – период расположения колец, $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны в свободном пространстве.

Результаты расчета зависимостей $n(r)$ и $c(r)$ для планарной линзы из колец полистирола ($\varepsilon_d=2.6$), $\varepsilon_0=1$ приведены на рис.2.

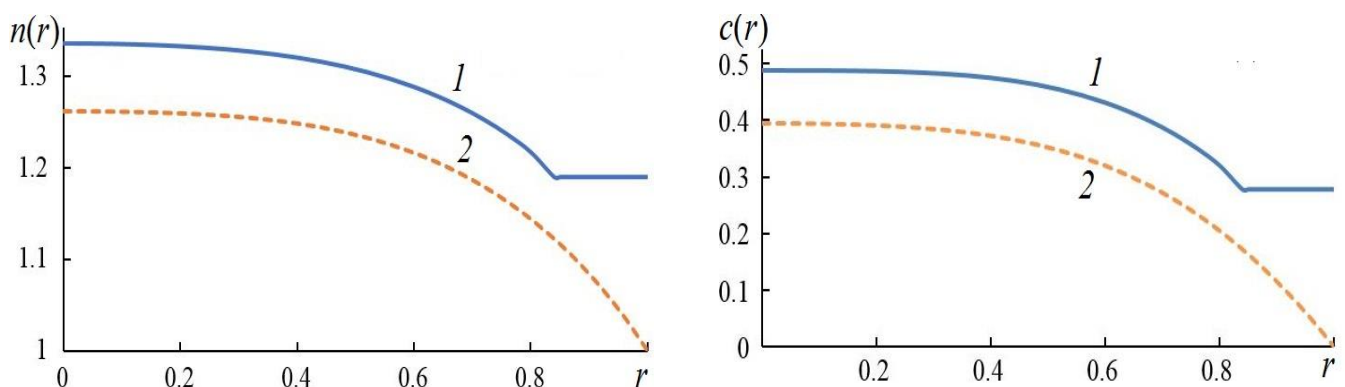


Рис. 2. Зависимость коэффициентов преломления $n(r)$ и заполнения $c(r)$ линзы с П-образной ДН, оболочкой (1) и без оболочки (2) от радиуса

С использованием МКЭ в программной среде Ansys HFSS проведено моделирование планарной линзовой антенны диаметром 100 мм, толщиной 3.4 мм с семью облучателями в виде открытого конца прямоугольного металлического волновода сечением 7.2x3.4 мм, формирующими семь лучей (рис. 3). Относительный уровень пересечения лучей -0.4 дБ на частоте 27 ГГц, -1.3 дБ на частоте 30 ГГц (рис. 3) и -2.4 дБ на частоте 33 ГГц. При этом абсолютный уровень пересечения соседних лучей меняется в пределах 14.4...15.0 дБ и в результате сектор обзора антенны в полосе частот 27–33 ГГц по уровню усиления 14.4 дБ превышает 100° .

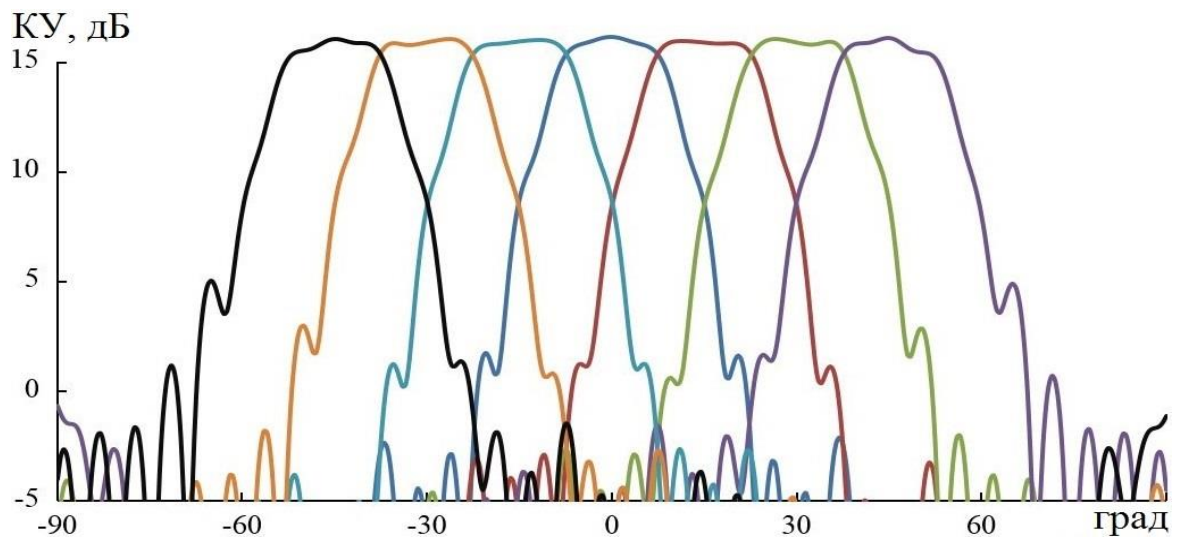


Рис. 3. Диаграммы направленности лучей планарной антенны в азимутальной плоскости на частоте 30 ГГц.

Во второй главе решена задача синтеза цилиндрической многослойной градиентной металлодиэлектрической линзы и на основе полученного решения разработаны и исследованы многолучевые антенны с полным азимутальным углом обзора без затенения апертуры антенны облучающей системой (рис. 4).

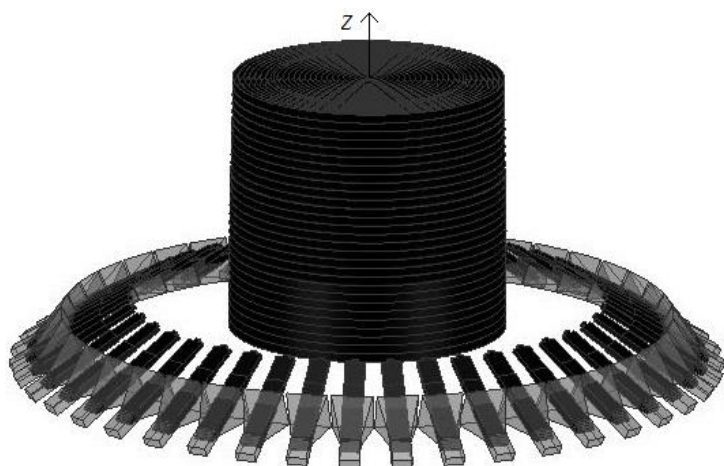


Рис. 4. Многолучевая линзовая антенна

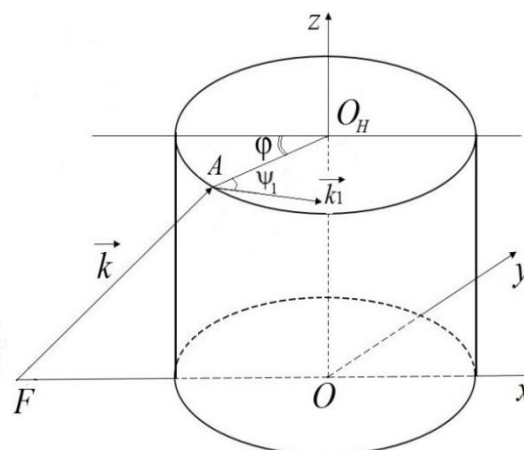


Рис. 5. Гибридное преломление луча

В разделе 2.1 разработана методика синтеза многослойной градиентной цилиндрической линзы, состоящей из набора слоев, каждый из которых представляет собой диэлектрический диск с градиентом коэффициента преломления вдоль радиуса. Диэлектрические диски расположены между металлическими дисками. Линза преобразует сферическую волну облучателя с вертикальной поляризацией - в плоскую волну.

Для анализа преломления и распространения волны внутри слоев использовано приближение геометрической оптики. При падении поля облучателя на поверхность линзы сферическая волна преломляется гибридным образом (естественно и вынуждено, рис. 5). Угол преломления ψ_1 находится из граничных условий (совпадения азимутальных компонент падающего и преломленного волнового вектора) на поверхности линзы. Далее с использованием закона Снеллиуса находится соответствующий угол падения в двумерной задаче (рис. 6). В результате задача синтеза трехмерной задачи сводится к двумерной с заданным лучевым полем источника при условии равенства эйконалов центральных лучей в каждом слое цилиндрической многослойной линзы.

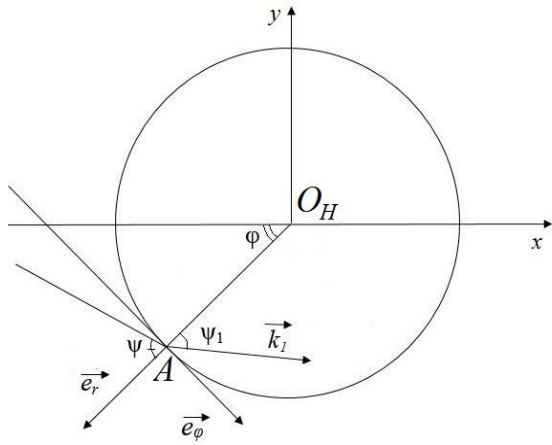


Рис. 6. Преломление в двухмерной задаче

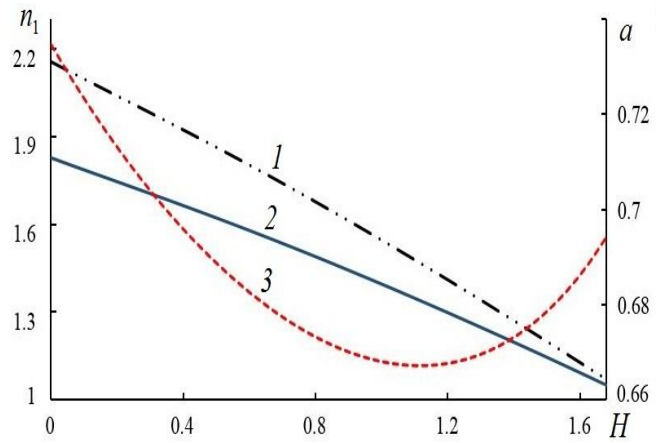


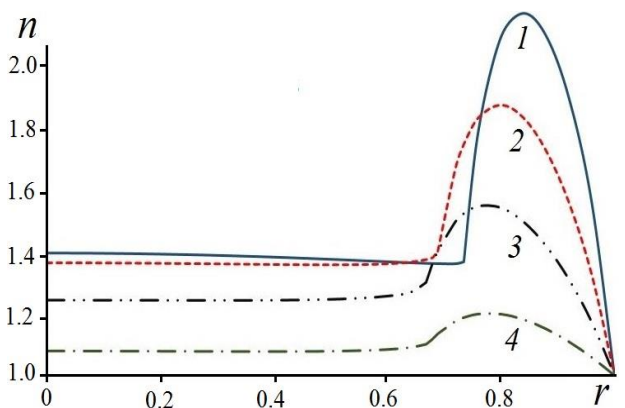
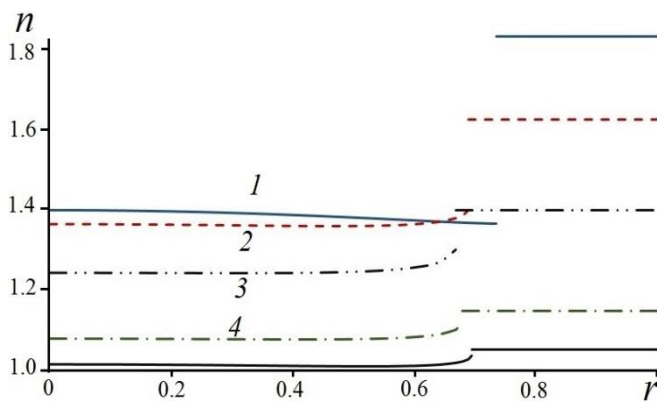
Рис. 7. Зависимость от высоты слоя максимального коэффициента преломления в неоднородной (1) и однородной (2) оболочках и радиуса оболочки (3)

Эйконал центрального луча в слое на высоте H удовлетворяет уравнению

$$\sqrt{(f-1)^2 + H^2} + 2 \int_a^1 n(r) dr + 2A(1 - \ln A) + 2 \int_0^A T(\rho) d\rho = \sqrt{(f-1)^2 + H_{\max}^2} + 2, \quad (4)$$

где $A = \sin \psi_0 = \sqrt{(f^2 - 1) / (f^2 - 1 + H^2)}$.

Результаты расчета максимального коэффициента преломления в неоднородной и однородной оболочках, а также максимального радиуса оболочки слоев в зависимости от высоты слоя, рассчитанные по формуле (4) с учетом условия (2) приведены на рис. 7, а соответствующие зависимости коэффициента преломления в линзах приведены на рис. 8.



а)

б)

Рис. 8. Зависимость коэффициента преломления от радиуса в линзе с однородной (а) неоднородной (б) оболочкой при $H = 0$ (1), 0.5 (2), 1 (3) и 1.5 (4).

В разделе 2.2 на основе синтезированной многослойной градиентной цилиндрической линзы радиусом $r_0 = 50$ мм, толщиной слоев $d = 3$ мм и фокусным расстоянием $f = 100$ мм, каждый слой которой выполнен в виде набора диэлектрических колец из полистирола, с однородной и неоднородной оболочкой построена модель многолучевой антенны. Рассчитанный по формуле (3) законы изменения коэффициента заполнения показаны на рис. 9.

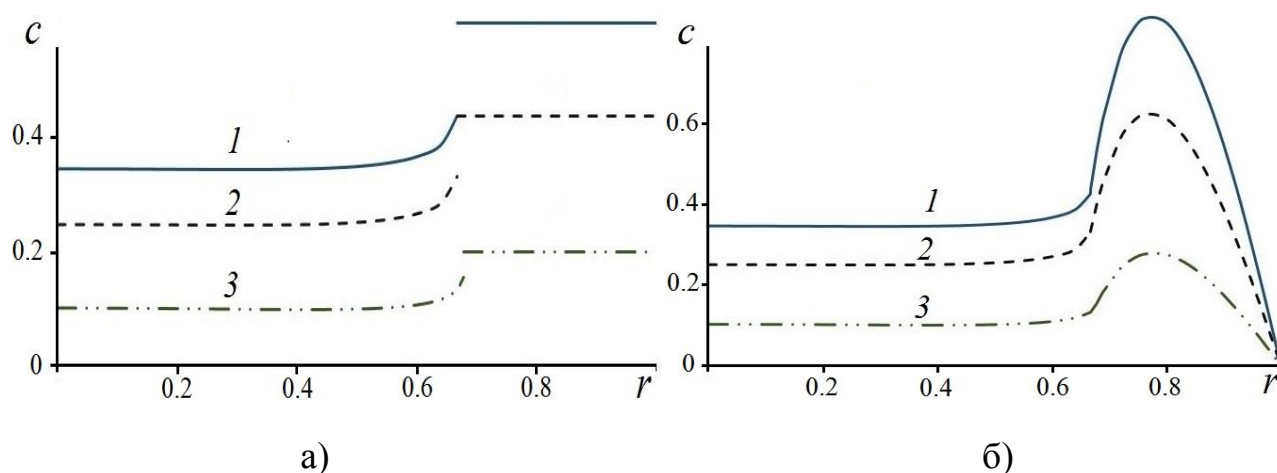


Рис. 9. Зависимости коэффициента заполнения от радиуса при $H = 1$ (1), 1.2 (2) и 1.5 (3) для линз с однородной (а) и неоднородной оболочкой (б)

В качестве облучателей антенны использованы металлические пирамидальные рупоры (рис. 10а) с входным сечением 7,2 x 3,4 мм, выходным - 20x15 мм и длиной 27 мм и металлодиэлектрические антенны поверхностной волны (рис.10б) в виде пирамидального металлического рупора с таким же входным сечением, выходным сечением 15x15 мм и расположенным внутри рупора ступенчатым диэлектрическим стержнем прямоугольного сечения. Оси облучателей направлены к центру линзы (под углом 30 градусов к горизонтальной плоскости).

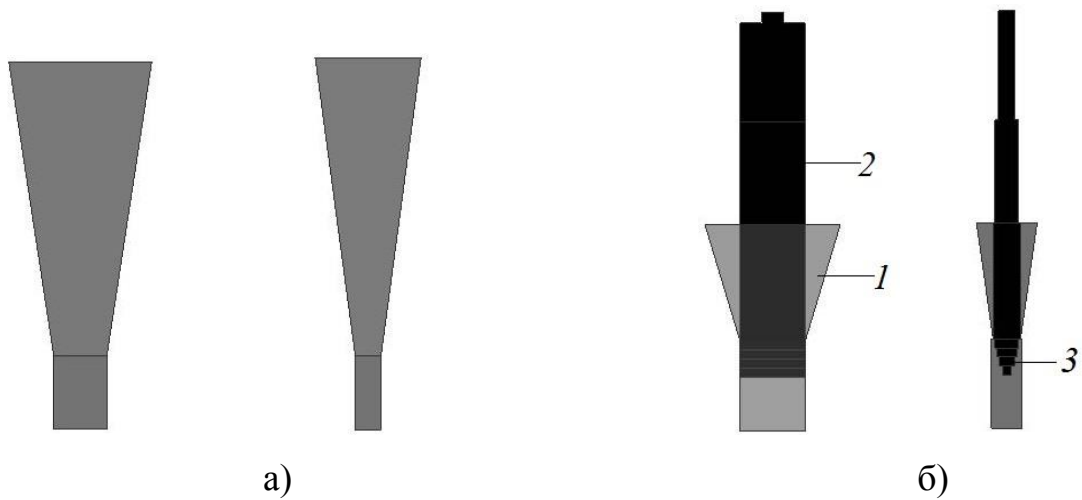


Рис. 10. Рупорные (а) и металлодиэлектрические (б) облучатели

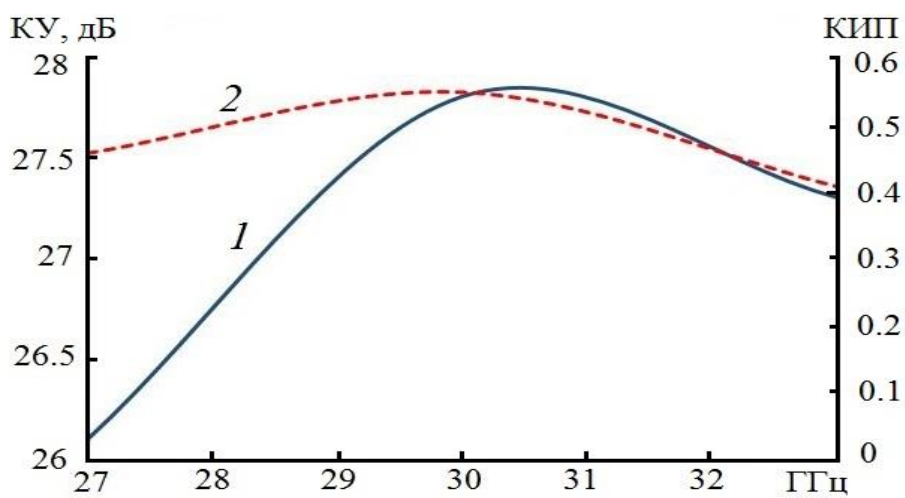


Рис. 11. Зависимость от частоты КУ(1) и КИП (2) линзы с однородными оболочками и металлическим рупорным облучателем

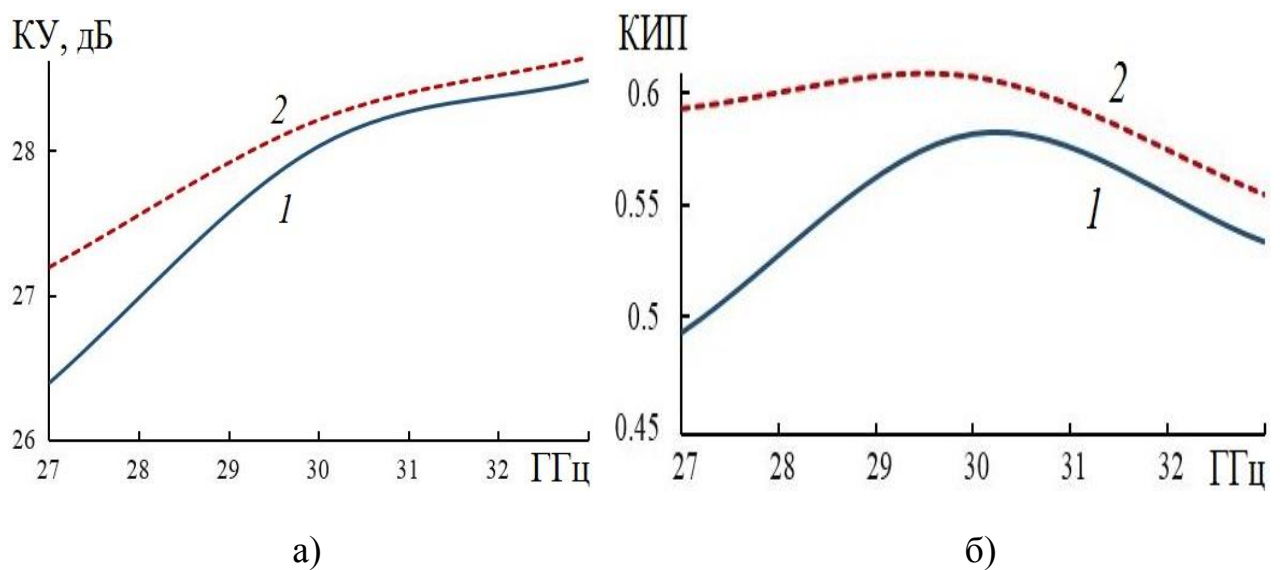


Рис. 12. Зависимость КУ (а) и КИП (б) антенны с металлодиэлектрическими

облучателями от частоты: с однородными (1) и неоднородными оболочками (2).

Результаты численного моделирования антенны с использованием МКЭ приведены на рис. 11,12. Несмотря на неполное использование апертуры, антенна на основе многослойной градиентной цилиндрической линзы с однородными оболочками обеспечивает уровень величины КИП более 0.5 с обоими типами облучателей, а с неоднородными оболочками и металлодиэлектрическим облучателем – более 0.55 в полосе частот более 20%.

В третьей главе исследованы геодезические линзы с плавным переходом к планарному волноводу. В общей постановке в приближении геометрической оптики решена задача синтеза металлодиэлектрической геодезической линзы с центральной симметрией, плавным переходом и оболочкой. На основе полученного решения разработаны три варианта линзовой антенны и проведено исследование их характеристик.

В разделе 3.1 исследовано влияние формы плавного перехода на характеристики геодезической линзовой антенны в виде двух параллельных искривленных идеально проводящих поверхностей, возбуждаемой Н-секториальным рупором (рис. 13). Синтезирована геодезическая линзовая антенна

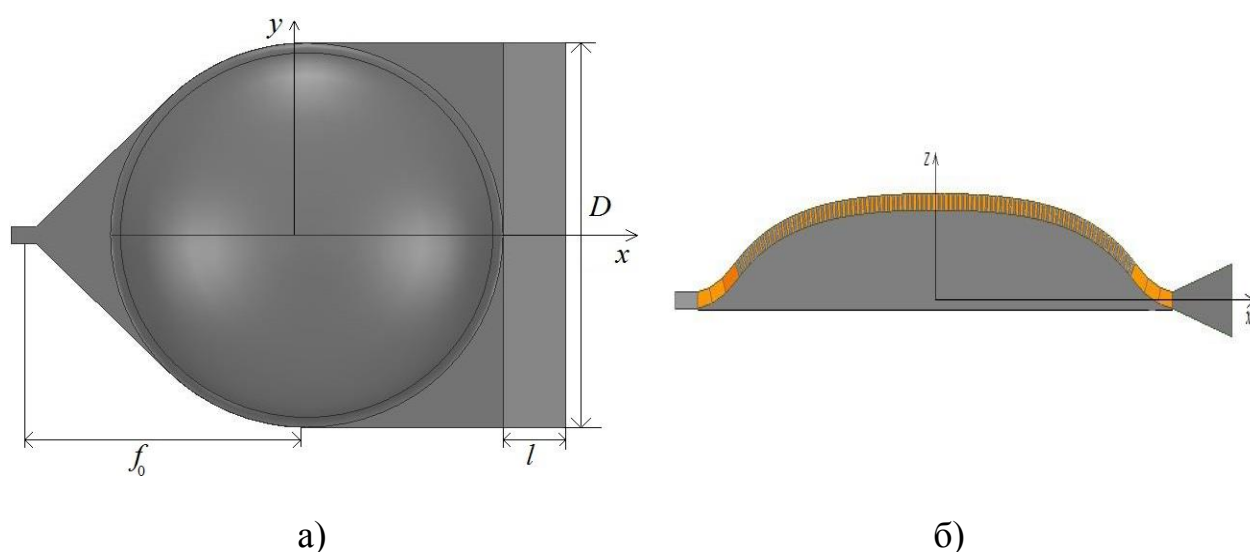


Рис. 13. Геодезическая линза с плавным переходом: а) вид сверху, б) сечение

с поликоническим плавным переходом. С использованием МКЭ проведено сравнение результатов численного моделирования линз с пятью вариантами геометрии плавного перехода и, в результате, показано, что наилучшими характеристиками обладает геодезическая линзовая антенна с поликоническим плавным переходом.

В разделе 3.2 решена задача синтеза металлодиэлектрической геодезической линзы с центральной симметрией, поликоническим переходом и оболочкой, которая преобразует поле цилиндрической волны источника в заданное геометрооптическое поле. Решение для формы профиля линзы имеет вид

$$z(r) = \int_0^r \sqrt{l'(r)^2 - 1} dr, \quad 0 \leq r \leq a, \quad z(r) = z_{i-1} + C_i(r - r_{i-1}), \quad r_i \leq r_{i-1}, \quad i=1, N, \quad r_N = a, \quad r_0 = 1, \quad r > a, \quad (5)$$

$$l'(r) = \frac{1}{\pi n(r)} \frac{d\rho}{dr} \left[\arcsin \left(\frac{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}}{\sqrt{f_0^2 - n(r)^2 r^2}} \right) - \frac{\pi n(r)^2 r^2}{2\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2} (A + \sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2})} - \pi - \frac{\arcsin(A/f_0)}{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}} + \right. \\ \left. + 2 \sum_{i=1}^N k_i \left(\arcsin \left(\frac{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}}{\sqrt{n_i^2 r_{i-1}^2 - n(r)^2 r^2}} \right) - \frac{\arcsin(A/n_i^2 r_{i-1}^2)}{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}} - \arcsin \left(\frac{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}}{\sqrt{n_i^2 r_i^2 - n(r)^2 r^2}} \right) + \frac{\arcsin(A/n_i^2 r_i^2)}{\sqrt{A^2 - n(r)^2 r^2}} \right) \right] - \\ - \frac{r\rho}{\pi} \frac{d\rho}{dr} \left[\frac{-\varphi(A)}{A\sqrt{A^2 - \rho^2}} + \int_{\rho}^A \frac{\varphi'(h)h - \varphi(h)}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} dh \right], \quad k_i = \sqrt{1 + C_i^2},$$

где величина A определена в (4), а n_i – коэффициенты замедления на каждом участке поликонического перехода.

На рис. 14 приведены рассчитанные с использованием формулы (5) профили линз и зависимости коэффициента замедления от радиуса линзы с плоским выходным фронтом однородным частичным (а) и градиентным (б) диэлектрическим заполнением, а также линзы с с однородным частичным диэлектрическим заполнением и столообразной диаграммой направленности (в).

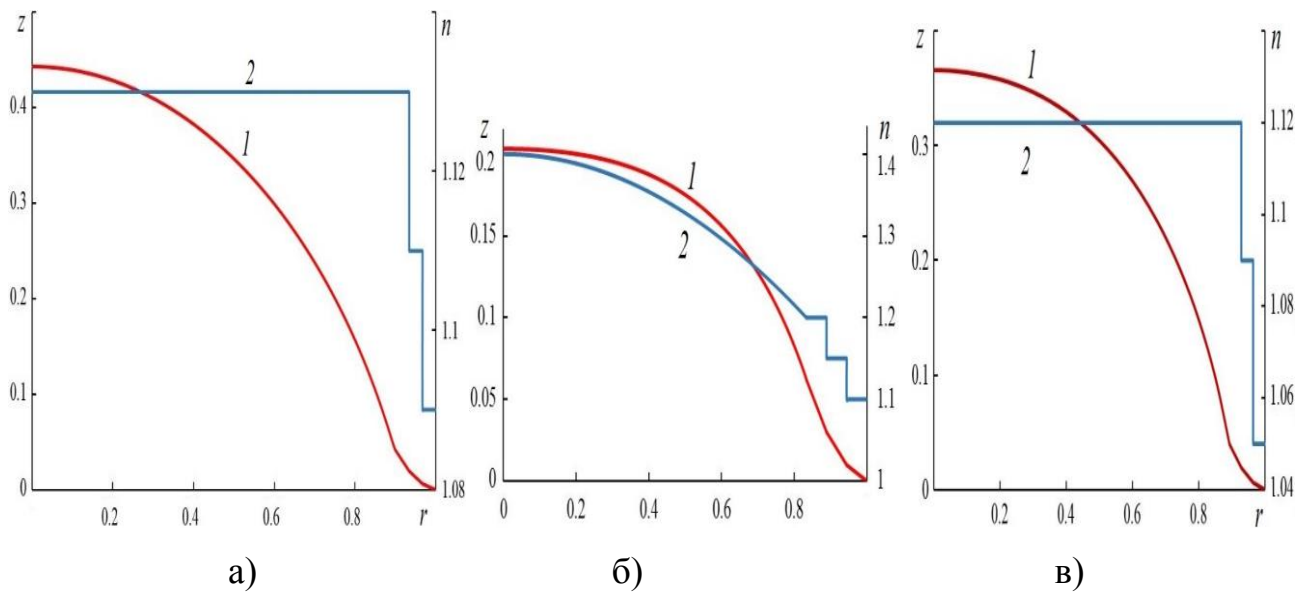


Рис. 14. Профиль линзы (1) и зависимость коэффициента замедления от радиуса (2): а) линза с однородным диэлектриком и плоским выходным фронтом б) линза с градиентным диэлектриком и линейным выходным фронтом в) линза с однородным диэлектриком и столообразной диаграммой направленности

Результаты численного моделирования частотной зависимости величины КИП линзовых антенн с плоским выходным фронтом показаны на рис. 15, а ДН антенны со столообразной формой лучей – на рис. 16.

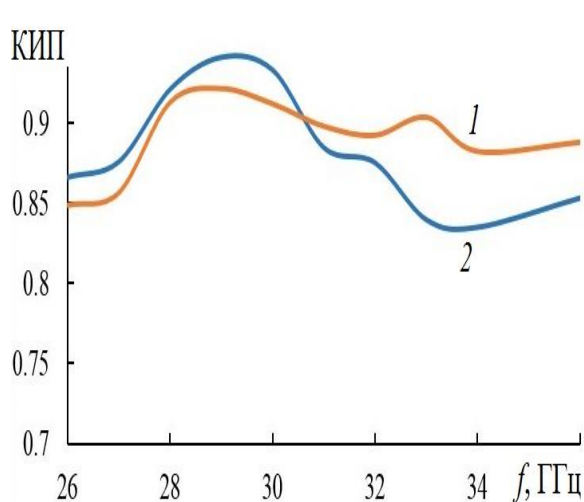


Рис. 15. Зависимость КИПа от частоты

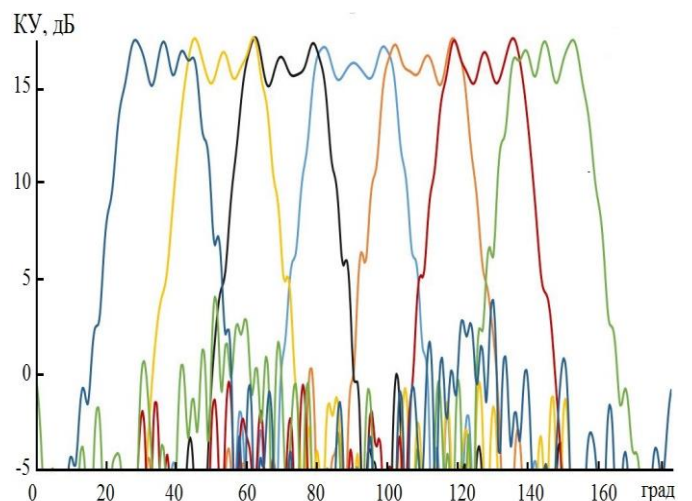


Рис. 16. ДН лучей П-образной формы

В четвертой главе решена задача синтеза цилиндрической многослойной геодезической металлодиэлектрической линзы, преобразующей сферический фронт поля облучателя в плоский фронт на выходе линзы и на ее основе разработаны и исследованы многолучевые антенны с полным азимутальным сектором обзора.

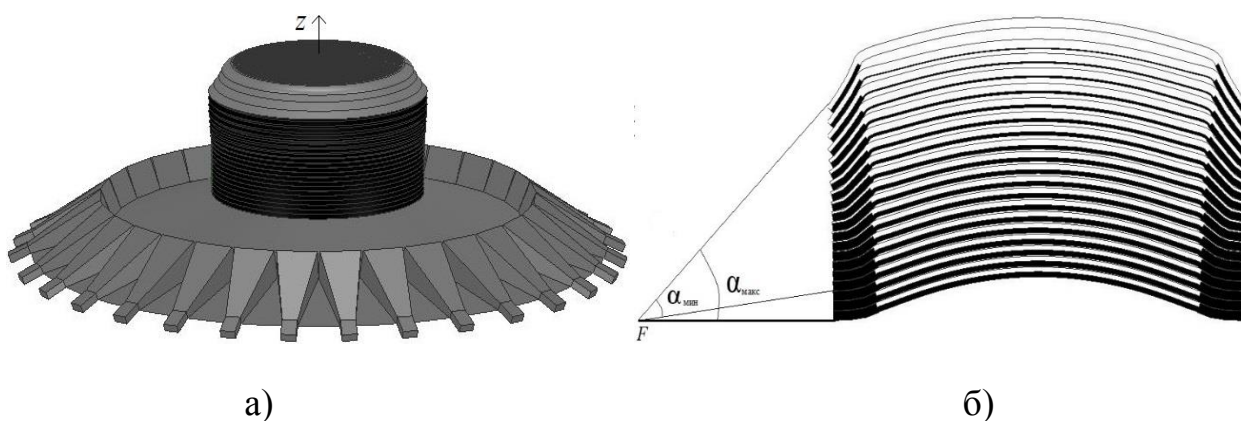


Рис. 19. Цилиндрическая линзовая антенна с металлическими облучателями:

а) общий вид б) сечение линзы

В разделе 4.1 разработана методика синтеза многослойной геодезической цилиндрической линзы (рис. 17), состоящей из набора слоев, каждый из которых представляет собой металлодиэлектрическую геодезическую линзу с осевой симметрией. Линза преобразует сферическую волну облучателя с вертикальной поляризацией - в плоскую волну. Методика синтеза основана на сведении трехмерной задачи к двумерной с заданным лучевым полем источника при условии равенства эйконалов центральных лучей в каждом слое цилиндрической многослойной геодезической линзы.

Результаты расчета по формуле (7) зависимости коэффициента замедления в центральной части линзы и оболочки линзы с тремя секциями поликонического перехода от высоты слоя приведены на рис. 20а.

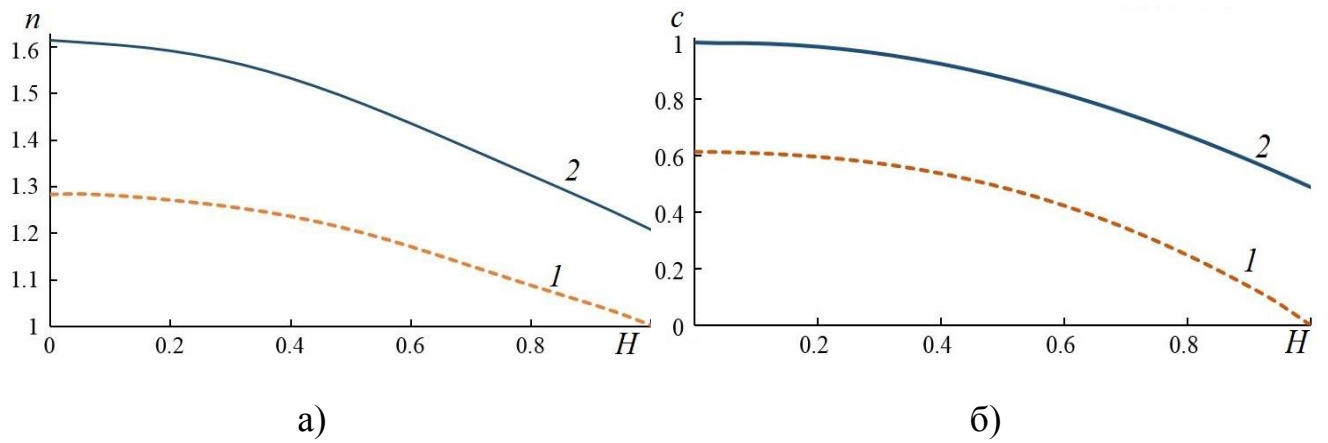


Рис. 20. Зависимости коэффициента замедления (а) и заполнения (б) в центральной части линзы (1) и оболочки (2) от высоты слоя

Зная величину коэффициента замедления на участках поликонического перехода (n_i) и центральной части (n_0) геодезической линзы, соответствующие толщины диэлектрических слоев a_0 и a_1 можно найти из дисперсионного уравнения для основной моды плоского металлодиэлектрического волновода

$$\cos(k_z nd) = \cos(\chi_1 a) \cos(\chi_2 b) - \frac{1 + \zeta^2}{2\zeta} \sin(\chi_1 a) \sin(\chi_2 b), \quad (6)$$

где $k_z = k_0 \sin \gamma$, $\zeta = \chi_1 \varepsilon_2 / \chi_2 \varepsilon_1$, $\chi_i = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_i \eta_i - k_0^2 n^2 \cos^2 \gamma}$, $i = 1, 2$, $\gamma = 90^\circ$, d – расстояние между металлическими стенками волновода, $b = d - a$, ε_1 – диэлектрическая проницаемость заполнения, $\varepsilon_2 = 1$. На рис. 20б показаны рассчитанные зависимости коэффициента заполнения $c = a / d$ слоя, частично заполненного полистиролом ($\varepsilon_1 = 2.6$) от высоты H для центральной части и оболочки.

В разделе 4.2 на основе многослойной геодезической цилиндрической линзы с однородным частичным диэлектрическим заполнением плавного перехода и центральной части линзы разработаны и исследованы многолучевые антенны с полным азимутальным сектором обзора без затенения апертуры антенны облучающей системой. Используются два типа облучателей антенны: H -секториальный рупор и металлодиэлектрическая антенна бегущей волны на

основе прямоугольного металлического волновода с диэлектрической вставкой (рис 10). Металлические (рис. 10а) и металлодиэлектрические (10б) облучатели с входным сечением 7,2 x 3,4 мм расположены вдоль радиальной координаты под углом 22.5 градусов к горизонтальной плоскости. Апертура металлических облучателей равна 38.8x14 мм, возбуждающих рупоров диэлектрических облучателей – 15x7.2 мм, длина выступающей части диэлектрических стержней – 24 мм. Путем численного моделирования с использованием МКЭ проведено исследование характеристик излучения антенны, результаты которого приведены на рис. 21, 22.

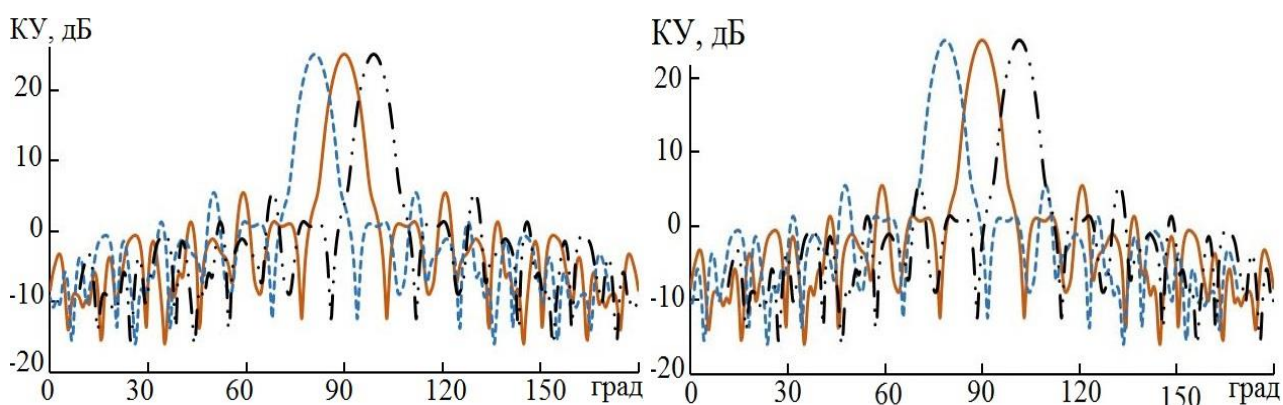


Рис. 21. Диаграммы направленности трех лучей линзовой антенны с 43 металлодиэлектрическими облучателями (а) и 31 металлическим облучателем (б)

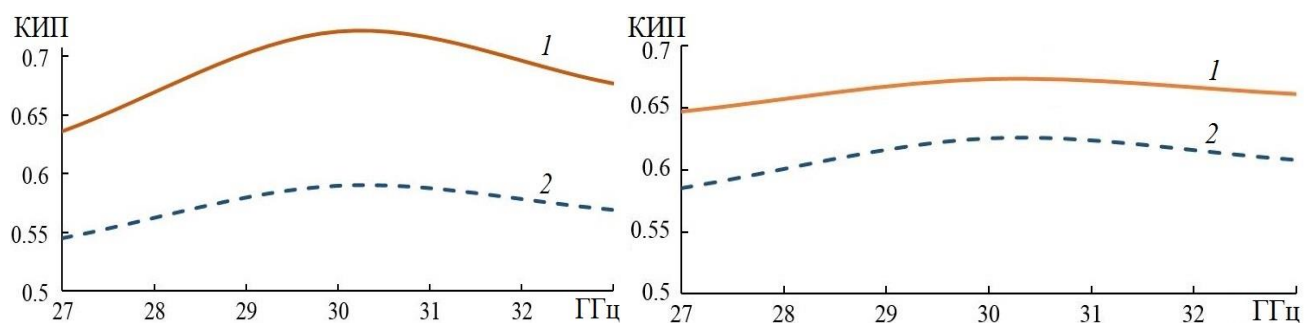


Рис. 22. Зависимость коэффициента использования поверхности от частоты линзовой антенны с металлодиэлектрическими (а) и металлическими (б) облучателями: трехлучевая антенна (1), многолучевая антенна (2).

Как видно на рисунках, небольшие отличия величин КИП однолучевых и многолучевых антенн подтверждают слабое влияние на характеристики излучения антенн рассеяния на облучающей системе, особенно в случае металлических облучателей. Однако уровень пересечения диаграмм направленности соседних лучей (рис. 21) в случае металлических облучателей (- 9 дБ) существенно ниже, чем в случае металло-диэлектрических облучателей (- 6 дБ). При этом несмотря на неполное использование апертуры, КИП многолучевой антенны с обоими типами облучателей превышает величину 0.55 во всей исследованной полосе частот.

В Заключении проведены основные результаты диссертации:

1. Получено решение задачи синтеза градиентной диэлектрической линзы с центральной симметрией, оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса.
2. Получено решение задачи синтеза цилиндрической многослойной градиентной металлодиэлектрической линзы с осевой симметрией.
3. Получено решение задачи синтеза металлических и металлодиэлектрических геодезических линз с осевой симметрией, плавным переходом, оболочкой, произвольным выходным фронтом и положением фокуса.
4. Получено решение задачи синтеза цилиндрической многослойной металлодиэлектрической геодезической линзы с осевой симметрией.
5. Разработана и исследована многолучевая антенна на основе градиентной многослойной цилиндрической металлодиэлектрической линзы с полным азимутальным углом обзора.
6. Разработана и исследована многолучевая антенна на основе геодезической многослойной цилиндрической металлодиэлектрической линзы с полным азимутальным углом обзора.

Основные результаты опубликованы в работах:

Список публикаций

1. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Исследование геодезических линз с плавным переходом. РЭ. 2022. Т. Т.67. №5. С. 447-453.
2. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Общее решение задачи синтеза градиентной линзы с центральной симметрией. РЭ. 2022. Т.67. №8. С. 754-760.
3. Venetskiy A. S, Kaloshin V.A, Tran T. T., Layered Gradient Cylindrical Lens with Axial Symmetry. 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. Nov. 2022. DOI: 10.1109/RMC55984.2022.10079354.
4. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Общее решение задачи синтеза геодезической линзы с центральной симметрией и диэлектрическим заполнением. РЭ. 2023. Т.68. №5. С. 417-423.
5. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Многолучевая антенна с полным азимутальным углом обзора на основе слоистой металлодиэлектрической цилиндрической линзы. РЭ. 2023. Т.68. №6. С.579-586.
6. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Многолучевая антенна с полным азимутальным углом обзора на основе многослойной геодезической линзы с осевой симметрией. Журнал радиоэлектроники. [электрон. журн.] 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.2>