

На правах рукописи



НГИЕМ Хыу Дык

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПОЛИФОКАЛЬНЫХ ЛИНЗ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Долгопрудный – 2018

Работа выполнена на кафедре радиотехники и систем управления Физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий (ФРКТ) ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ) Министерства образования и науки Российской Федерации.

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

Официальные оппоненты **Климов** Константин Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник опытно-конструкторского бюро АО НПО «ЛЭМЗ»
Шишлов Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, начальник антенного отдела ПАО «Радиофизика»

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

Защита состоится 21 декабря 2018 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (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/Ngiem/index.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета кандидат
физико-математических наук



Копылов
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Теория и практика многолучевых антенн и радиообъективов интенсивно развивается. Это определяется, в первую очередь, развитием систем радиолокации, радиовидения и связи.

Существуют хорошо известные пути реализации многолучевой диаграммы направленности антенн. Первый из них – применение квазиоптической системы с линзой или зеркалом. Вторым подходом – использование многолучевой антенной решетки. Недостатками аналоговых многолучевых антенных решеток с матричным диаграммо-формированием являются сложность конструкции и большие потери в элементах матриц, особенно в миллиметровом диапазоне волн. Недостатки цифровых многолучевых решеток – высокая стоимость и ограниченная полоса частот. Выходом в ряде случаев является использование гибридной схемы обзора – использование двумерной квазиоптической системы для формирования многолучевой диаграммы направленности решетки в одной плоскости и иной способ формирования диаграммы – в ортогональной плоскости.

Многолучевые квазиоптические системы широко применяются в оптическом, инфракрасном диапазоне, а также в верхней части радиодиапазона электромагнитных волн. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн в качестве фокусирующих элементов многолучевых антенн и радиообъективов широко используются диэлектрические линзы, при этом наиболее широким телесным углом зрения обладают апланатические линзы [1]. Наибольший одномерный сектор обзора обеспечивают диаграммо-образующие системы на основе линз с принудительным преломлением [2-5]. Они обладают большим числом степеней свободы и позволяют синтезировать полифокальные системы с двумя, тремя и четырьмя фокусами. Попытки в работе [6] синтезировать пятифокальную линзу с целью формирования двумерной многолучевой диаграммы направленности привело к разрывному решению.

Следует отметить, что все известные работы по синтезу линз с принудительным преломлением посвящены диаграммо-образующим системам,

формирующим на выходе плоские волновые фронты (фокусы с одной стороны от линзы расположены на бесконечности). В то же время при создании радиообъективов для систем ближнего радиовидения возникает задача реализации заданного положения фокальных поверхностей. Такая же ситуация возникает при создании новых поколений мобильной связи (с использованием микро и пикосот). Кроме того, при синтезе многолучевых диаграмм направленности для систем спутниковой связи и телевидения с целью обслуживания конкретной территории часто возникает задача реализации телесного угла зрения антенны с заданной формой границы.

Работы, посвященные синтезу диэлектрических линз, также ограничиваются случаем формирования на выходной поверхности плоских волновых фронтов. Алгоритм основан на нахождении узловых (опорных) точек, в которых с использованием закона Снеллиуса находятся нормали к поверхности линзы, удовлетворяющие условиям фокусировки при расположении источника в двух фокальных точках. Затем, путем интерполяции, определяются обе поверхности линзы. Недостатком такого подхода является априори приближенный характер полученного решения. При этом остается открытым вопрос о сходимости соответствующего алгоритма при увеличении числа опорных точек с целью повышения точности решения задачи синтеза.

В работах Б.Е.Кинбера с соавторами [7] была предложена методика решения задачи синтеза бифокальной двухзеркальной системы, преобразующей две расходящиеся сферические или цилиндрические волны в сходящиеся или плоские волны, основанная на известном подходе к решению дифференциальных уравнений с запаздывающим (отклоняющимся) аргументом. В работе приведены также соответствующие уравнения для синтеза бифокальной диэлектрической линзы. Методика основана на задании начального участка поверхности зеркала или линзы и затем последовательного нахождения других участков. Для получения гладкого решения приведены условия сопряжения с требованием непрерывности функций, описывающих поверхности, а также их производных на границах этих участков. К сожалению, эта методика была реализована только для

одного частного случая двумерной двухзеркальной системы с практическим полным отсутствием описания полученного решения и алгоритма решения [8]. Кроме того, в этих работах отсутствует ответ на вопрос о выборе начального участка, а условия сопряжения не обеспечивают точного геометрооптического синтеза.

Задача синтеза трехфокальных диэлектрических линз в известных работах не рассматривалась.

Таким образом, даже в частном случае двумерных бифокальных диэлектрических линз, формирующих два плоских волновых фронта (фокусы расположены на бесконечности), отсутствуют методики и реализующие их алгоритмы, обеспечивающие решение задачи синтеза с заданной точностью.

Из изложенного выше следует, что задачи синтеза линз с обеспечением заданной точности, заданным положением фокальных поверхностей и формы границы телесного угла зрения, является актуальными.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методик и алгоритмов, обеспечивающих заданную точность геометрооптического синтеза, а также синтез и анализ полифокальных линз различного типа с заданным положением фокальных поверхностей и формой границы телесного угла зрения.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

- вывода уравнений для синтеза полифокальных линз с принудительным преломлением и произвольным расположением фокальных точек,
- решения уравнений для синтеза полифокальных линз с принудительным преломлением,
- разработки методики синтеза диэлектрических полифокальных линз,
- разработки алгоритмов синтеза бифокальных и трехфокальных диэлектрических линз и их программная реализация,
- анализа аберраций синтезированных линз,
- построение электродинамических моделей и проведение численных экспериментов.

Научная новизна.

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

- Впервые решены задачи синтеза и анализа линз с принудительным преломлением и произвольным положением фокусов.

- Показано, что в случае пяти фокусов с каждой стороны линзы задача синтеза сводится к трем трансцендентным уравнениям, а в случае четырех фокусов - к двум.

- Для полифокальных линз с тремя плоскостями симметрии получено решение задачи синтеза в явном виде.

- В явном виде получено решение задачи синтеза двумерной линзы из линий одинаковой длины с тремя фокусами на бесконечности.

- В явном виде получено решение задачи синтеза трехмерной линзы с пятью фокусами, расположенными на бесконечности.

- Исследованы двумерные бифокальные и трехфокальные линзы и показано, что минимальной величиной aberrации обладают линзы из линий одинаковой длины.

- Синтезирована и исследована четырехфокальная апланатическая линза.

- Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза бифокальных цилиндрических диэлектрических линз.

- Разработаны методика и алгоритм приближенного решения задачи геометрооптического синтеза трехфокальных цилиндрических градиентных диэлектрических линз.

- Показано, что градиентные трехфокальные цилиндрические градиентные диэлектрические линзы обеспечивают в 4-20 раз меньшие aberrации, чем бифокальные.

Практическая значимость работы.

В результате работы получены следующие, имеющие практическую значимость результаты:

- Разработана конструкция диаграммообразующей системы радиообъектива на основе планарной четырехфокальной апланатической волноводной линзы.

- Разработана конструкция широкополосной двухэтажной трехфокальной линзо - зеркальной антенны из полых прямолинейных волноводов одинаковой длины с абберациями, меньшими, чем у известных трехфокальных линз Рузе и Ротмана.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Задача синтеза полифокальных линз с принудительным преломлением в общем случае сводится к трем трансцендентным уравнениям.
2. Из линз с принудительным преломлением и одинаковым количеством фокусов наименьшими абберациями обладают линзы из линий одинаковой длины.
3. Развита методика обеспечивает точное решение задачи геометрооптического синтеза бифокальных диэлектрических линз.
4. Развита методика обеспечивает приближенное решение задачи геометрооптического синтеза трехфокальных градиентных диэлектрических линз.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях: III Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва. 2015 г.; IV Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва. 2016 г.; 27 Международной конференции «СВЧ-техниемка и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2017 г.; Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфо - коммуникационных технологий». Сер. Научные конференции, посвященные Дню радио. Москва. 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 - в трудах Международных и Всероссийских конференций. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 108 м.п. страниц.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: вывод уравнений для синтеза полифокальных линз с принудительным преломлением, решение этих уравнений для различных случаев значений параметров, программная реализация алгоритмов синтеза бифокальных и трехфокальных диэлектрических линз, анализ aberrаций синтезированных линз, построение электродинамических моделей с использованием метода конечных элементов и проведение численных экспериментов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы из 41 наименования. Диссертационная работа изложена на 93 страницах, содержит 39 рисунков.

ОСНОВНОЕ 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.

Основная часть диссертации состоит из трёх глав.

В первой главе рассмотрены двумерные задачи синтеза и анализа линз с принудительным преломлением и симметричными относительно одной из координат фокальными линиями (рис.1). Каждая фокальная линия при этом проходит через два, три или четыре фокуса. При расположении источника расходящейся цилиндрической волны в одном из фокусов, линза преобразует его поле в поле сходящейся цилиндрической волны с соответствующим фокусом с другой стороны линзы.

В общем случае, задача синтеза четырехфокальной линзы сведена к двум трансцендентным уравнениям:

$$\begin{aligned} \sqrt{f_1 \cos \alpha + Q_1^2 + f_1 \sin \alpha + y_1^2} + \sqrt{f_1' \cos \alpha - Q_2^2 + f_1' \sin \alpha - y_2^2} + l = f_1 + f_1'; \\ \sqrt{f_3 \cos \beta + Q_1^2 + f_3 \sin \beta + y_1^2} + \sqrt{f_3' \cos \beta - Q_2^2 + f_3' \sin \beta - y_2^2} + l = f_3 + f_3'. \end{aligned} \quad (1)$$

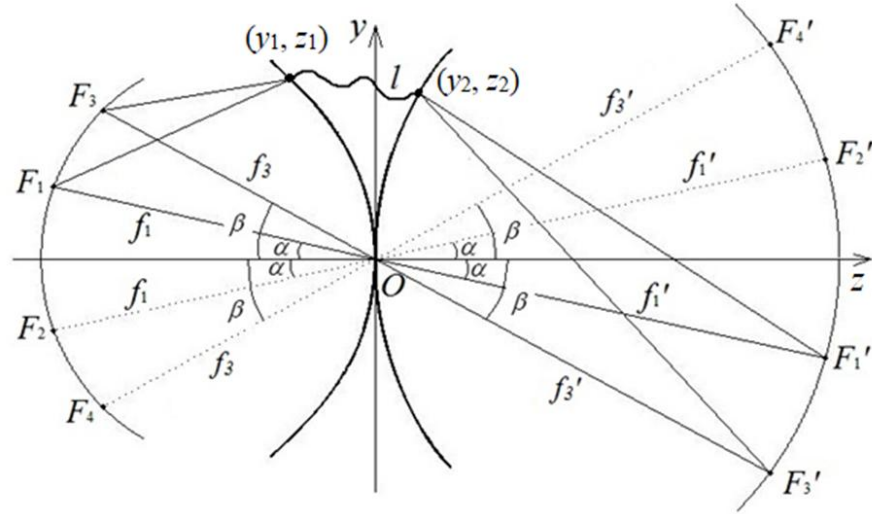


Рис. 1. Двухмерная четырехфокальная линза с принудительным преломлением.

$$\text{где } Q_1 = z_1 = \frac{f_3^2 - f_1^2 + P_1 - P_3}{2 f_1 \cos \alpha - f_3 \cos \beta}; \quad P_1 = \frac{f_1 + f_1' - l^2 y_1^2 f_1^2}{y_1 f_1 + y_2 f_1'^2} + \frac{\sin^2 \alpha y_1 f_1 + y_2 f_1'^2}{f_1 + f_1' - l^2};$$

$$P_3 = \frac{f_3 + f_3' - l^2 y_1^2 f_3^2}{y_1 f_3 + y_2 f_3'^2} + \frac{\sin^2 \alpha y_1 f_3 + y_2 f_3'^2}{f_3 + f_3' - l^2}; \quad Q_2 = z_2 = \frac{f_3'^2 - f_1'^2 + P_1' - P_3'}{2 f_3' \cos \beta - f_1' \cos \alpha};$$

$$P_1' = \frac{f_1 + f_1' - l^2 y_2^2 f_1'^2}{y_1 f_1 + y_2 f_1'^2} + \frac{\sin^2 \alpha y_1 f_1 + y_2 f_1'^2}{f_1 + f_1' - l^2}; \quad P_3' = \frac{f_3 + f_3' - l^2 y_2^2 f_3'^2}{y_1 f_3 + y_2 f_3'^2} + \frac{\sin^2 \alpha y_1 f_3 + y_2 f_3'^2}{f_3 + f_3' - l^2}.$$

В случае двумерной линзы с двумя плоскостями симметрии (с симметричными фокальными кривыми) для двух-, трех- и четырехфокальной линз получено решение в параметрической форме. Для четырехфокальной линзы, в частности, решение имеет вид:

$$z = z_0 - \frac{P + \sqrt{P^2 - 4Q}}{2}; \quad (2)$$

$$y = \pm \sqrt{\frac{2 f_1 \cos \alpha - f_3 \cos \beta}{4L} \frac{z_0 - z + f_1 - f_3}{4L} \frac{l - l_0}{4L}};$$

где длина линий l является параметром; z_0 – половина толщины линзы в центре;

$$P = \frac{f_1 \cos \alpha - f_3 \cos \beta}{2L} M - 2 f_1 \cos \alpha; \quad Q = f_1^2 - \frac{2 f_1 + l_0 - l^2}{4} - \frac{f_1 - f_3}{4L} \frac{l - l_0}{4L} M;$$

$$M = \frac{4f_1^2 \sin^2 \alpha}{2f_1 + l_0 - l^2} - 1; \quad L = \frac{f_1^2 \sin^2 \alpha}{2f_1 + l_0 - l^2} - \frac{f_3^2 \sin^2 \beta}{2f_3 + l_0 - l^2}.$$

Для всех типов линз проведена оптимизация параметров, обеспечивающая максимальный угол зрения и анализ среднеквадратической aberrации (СКА) различных вариантов полифокальных линз. Проведен сравнительный анализ СКА бифокальных волноводных, плоских линз и линз из линий одинаковой длины, а также трех- и четырехфокальных линз.

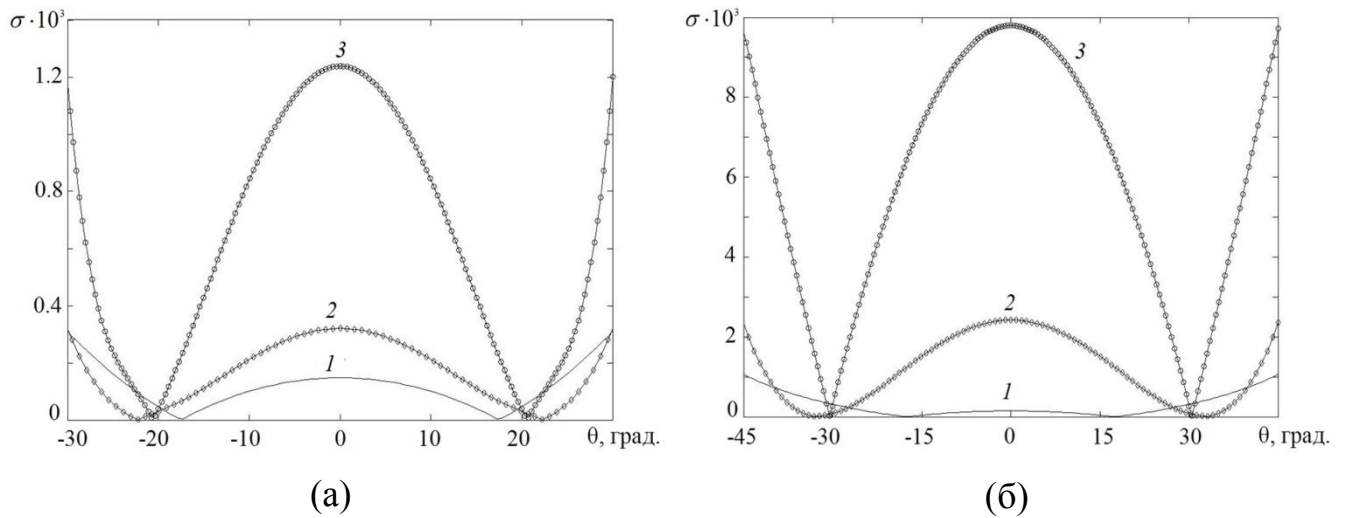


Рис. 2. Зависимость СКА от угла зрения 60- (а) и 90-градусной (б) бифокальной линзы: кривая 1 - СКА бифокальной линзы из линий одинаковой длины; кривая 2 – линзы из одинаковых прямолинейных волноводов, кривая 3 – плоской линзы.

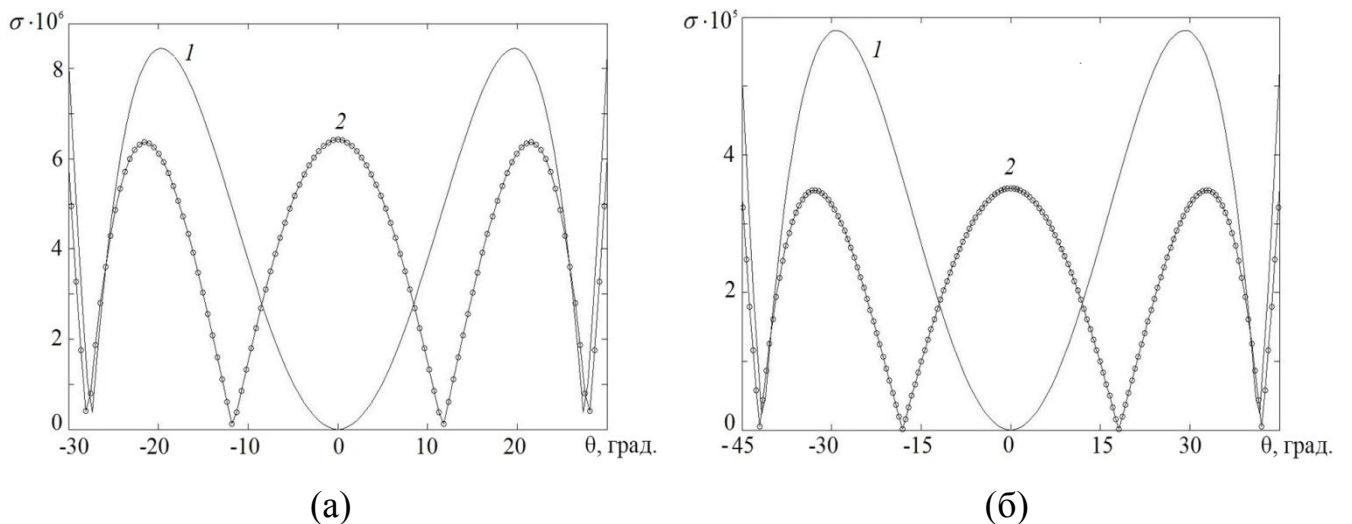


Рис. 3. Зависимость СКА от угла зрения для трех и четырехфокальной линзы, оптимизированной для угла зрения 60 (а) и 90 град (б). Кривая 1 - величина СКА трехфокальной линзы, кривая 2 – четырехфокальной.

На рис. 2а, б показаны зависимости СКА от угла зрения θ бифокальных линз с максимальными углами зрения 60° и 90° , соответственно. Как видно на рисунках, минимальное значение имеет СКА линз из линий одинаковой длины, синтезированная в а максимальное – плоских линз.

На рис. 3а и 3б показаны зависимости СКА трех- и четырехфокальных линз от угла зрения θ для максимального угла зрения 60° и 90° , соответственно. Видно, что для максимального угла зрения 60° СКА четырехфокальной линзы меньше, чем трехфокальной линзы почти в 1.5 раза, а для 90° - почти в два раза.

Исследование зависимости СКА от фокальных расстояний показало, что существует оптимальное соотношение фокальных расстояний, обеспечивающее ее минимум (рис.4).

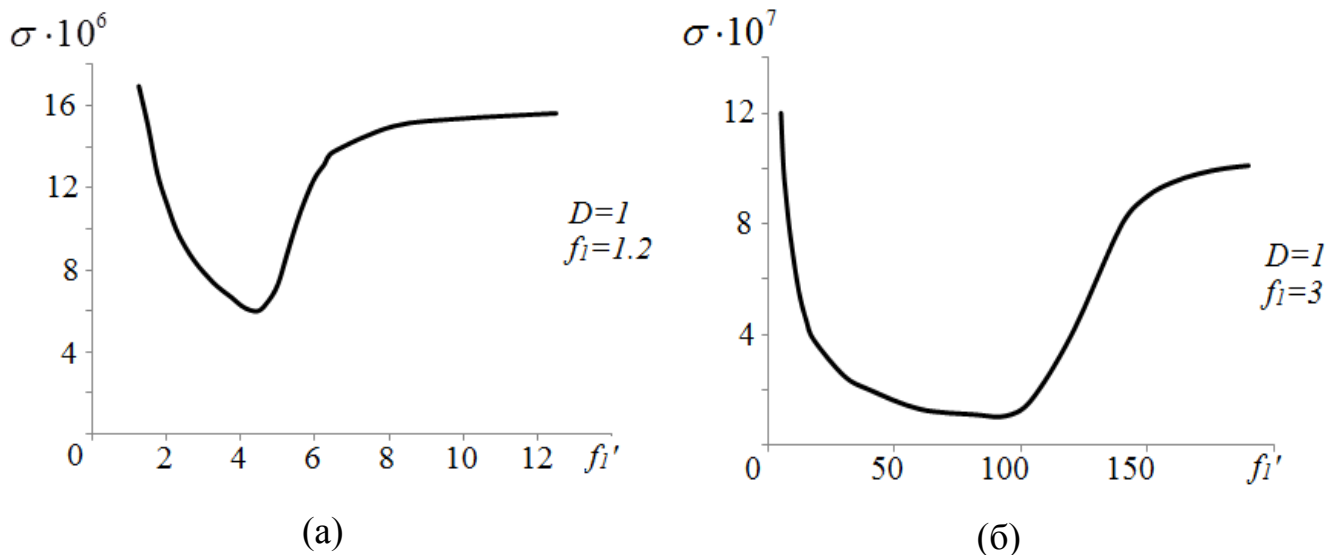


Рис. 4. Зависимости СКА двухмерных четырехфокальных линз от фокального расстояния.

Для проверки сканирующих свойств синтезированных линз с использованием метода конечных элементов проведено численное электродинамическое моделирование четырехфокальных линзовых объективов с углами зрения 60 и 90 градусов и симметричными фокальными кривыми, в результате которого получены характеристики сканирования при перемещении рупорного облучателя по оптимизированным по критерию минимальной СКА и

максимальной аппаратной функции фокальным кривым внутри планарного волновода (рис. 5,6).

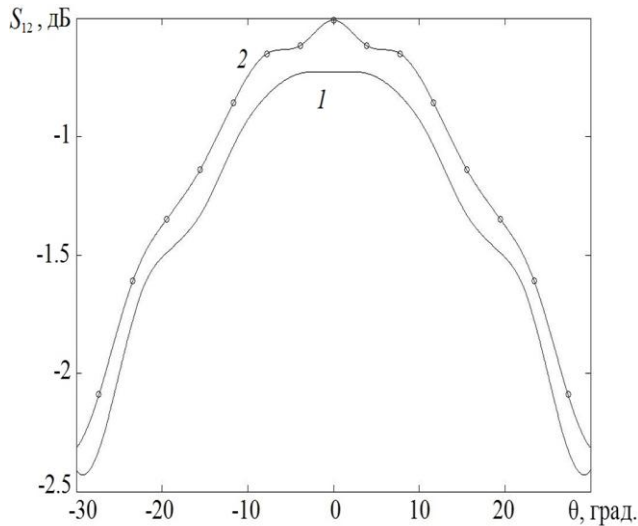


Рис. 5. Зависимость аппаратной функции четырехфокального линзового объектива от угла зрения для двух оптимизированных фокальных кривых.

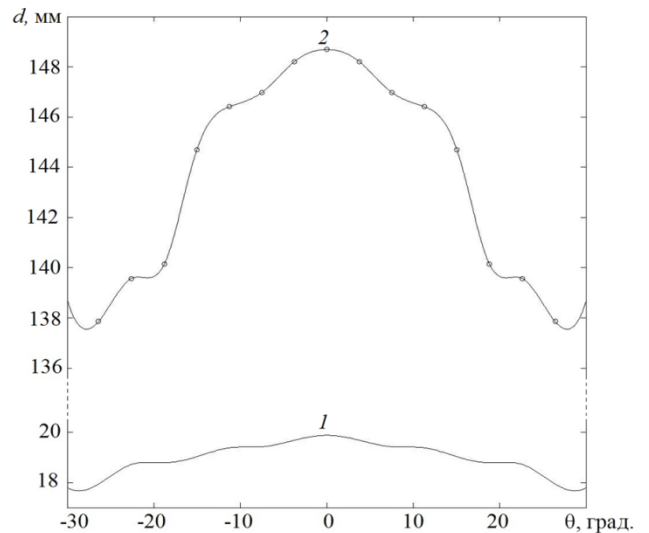


Рис. 6. Зависимость поперечного (кривая 1) и продольного размера (кривая 2) фокального пятна четырехфокального линзового объектива от угла зрения

В последнем разделе главы решена задача синтеза трехфокальной линзы с принудительным преломлением и линиями одинаковой длины, которая преобразует цилиндрический фронт источника с центром в одной из трех фокальных точек в соответствующий плоский фронт. Показано, что такая линза обеспечивает существенно меньшую величину СКА по сравнению с трехфокальными линзами Рузе и Ротмана [2, 3] (рис. 7). На основе полученного решения задачи синтеза и минимизации aberrаций предложена и в результате проведения численного эксперимента исследована широкополосная цилиндрическая двухэтажная трехфокальная линзо - зеркальная антенна из волноводов одинакового сечения и длины.

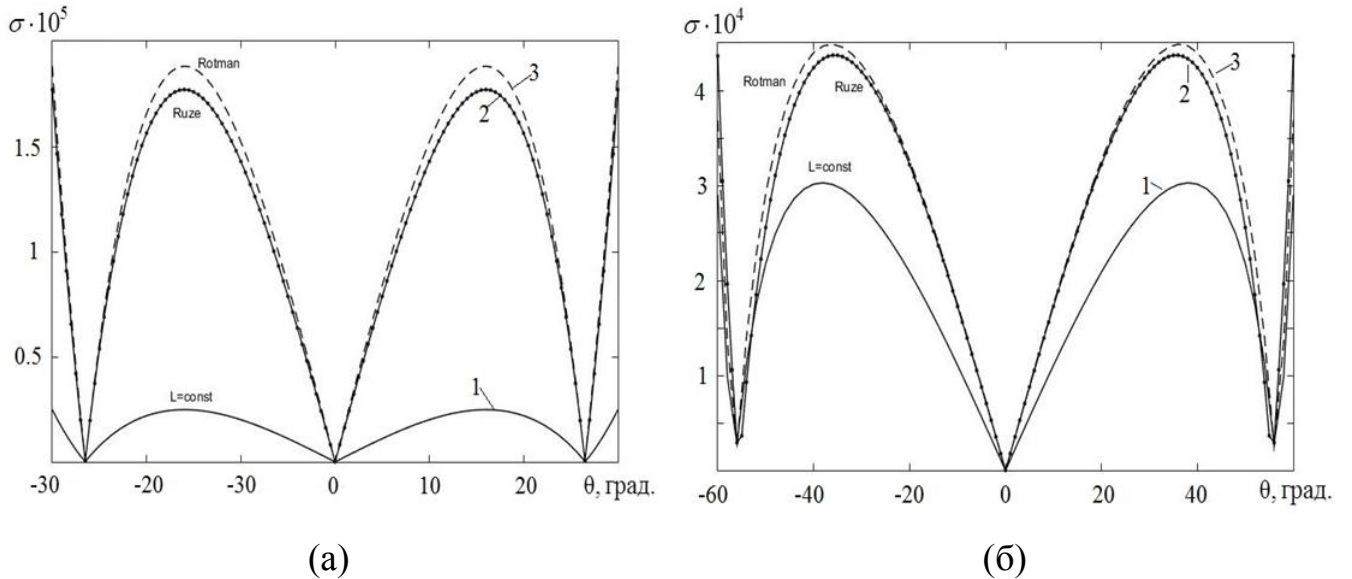


Рис. 7. Зависимость СКА трехфокальных линз, оптимизированных для угла зрения 60 (а) и 120 град. (б). Кривая 1 - величина СКА линзы с одинаковой длиной линий, кривая 2 – линзы Рузе [2], кривая 3 – линзы Ротмана [3].

Во второй главе рассмотрены трехмерные задачи синтеза и анализа полифокальных линз с принудительным преломлением с тремя, двумя и одной плоскостями симметрии при различных вариантах расположения фокусов. При расположении источника расходящейся сферической волны в одном из фокусов, линза в общем случае преобразует его поле в поле сходящейся сферической волны с фокусом с другой стороны линзы (рис. 8). В случае бесконечно удаленного фокуса линза формирует соответствующую плоскую волну.

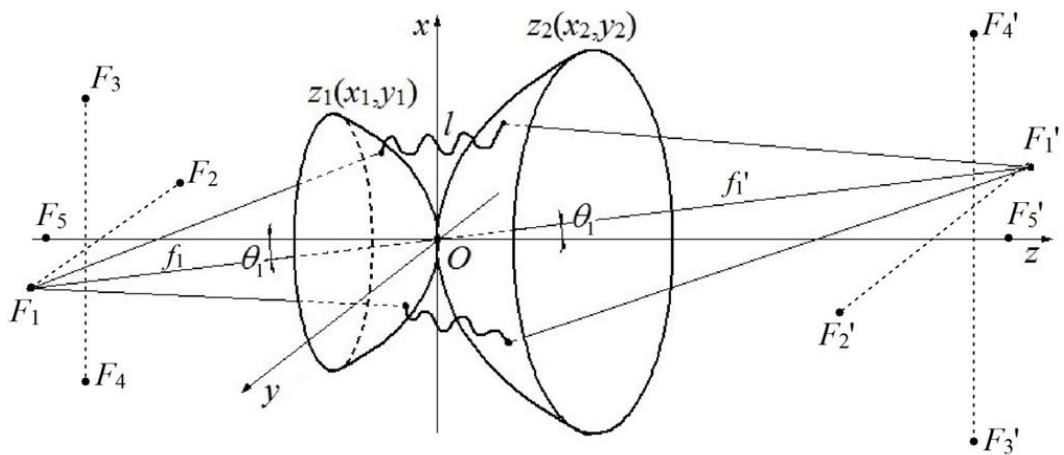


Рис. 8. Пятифокальная линза с принудительным преломлением.

В случае линзы с одной плоскостью симметрии задача синтеза пятифокальной линзы сведена к трем трансцендентным уравнениям:

$$\begin{aligned} & \sqrt{f_k \sin \theta_k \sin \gamma_k - x_1^2 + f_k \sin \theta_k \cos \gamma_k - y_1^2 + f_k \cos \theta_k + V_1^2} + l + \\ & + \sqrt{f_k' \sin \theta_k \sin \gamma_k + x_2^2 + f_k' \sin \theta_k \cos \gamma_k + y_2^2 + f_k' \cos \theta_k - V_2^2} = f_k + f_k'; \end{aligned} \quad (3)$$

где $k = 1, 3, 5$; $f_k = OF_k$; $f_k' = OF_k'$; θ_k – угол между лучом F_kO и осью Oz соответственно (O – начало системы координат); γ_k – угол между лучом OF_k'' и осью Oy соответственно (F_k'' – проекция F_k на плоскости xu соответственно); l – длина линии, соединяющей входной (x_1, y_1, z_1) и выходной (x_2, y_2, z_2) точек;

$$V_1 = z_1 = f_3^2 - f_1^2 + 2x_1 f_1 \sin \theta_1 \sin \gamma_1 - f_3 \sin \theta_3 \sin \gamma_3 + U_1 - U_3 / 2 f_1 \cos \theta_1 - f_3 \cos \theta_3 ;$$

$$V_2 = z_2 = f_3'^2 - f_1'^2 + 2x_1 f_3' \sin \theta_3 \sin \gamma_3 - f_1' \sin \theta_1 \sin \gamma_1 + U_1' - U_3' / 2 f_3' \cos \theta_3 - f_1' \cos \theta_1 ;$$

$$U_k = f_k + f_k' - l^2 y_1^2 f_k^2 / y_1 f_k + y_2 f_k'^2 + \sin^2 \theta_k \cos^2 \gamma_k y_1 f_k + y_2 f_k'^2 / f_k + f_k' - l^2 ;$$

$$U_k' = f_k + f_k' - l^2 y_2^2 f_k'^2 / y_1 f_k + y_2 f_k'^2 + \sin^2 \theta_k \cos^2 \gamma_k y_1 f_k + y_2 f_k'^2 / f_k + f_k' - l^2 .$$

В случае линзы с двумя плоскостями симметрии задача синтеза четырехфокальной линзы сведена к двум трансцендентным уравнениям. Для линзы с тремя плоскостями симметрии получено аналитическое решение задачи синтеза четырехфокальной линзы. В первом варианте все четыре фокуса лежат в одной из плоскостей симметрии линзы. Во втором варианте два фокуса лежат в одной плоскости симметрии линзы, а два других – в другой (ортогональной) плоскости симметрии. Также аналитическое решение получено для линзы с четырьмя фокусами, лежащими в одной плоскости и формирующей четыре плоские волны, удовлетворяющей условию апланатизма в ортогональной плоскости.

На рис. 9а показаны линии уровня СКА линзы с тремя плоскостями симметрии и фокусами на оси y (на рисунке показаны точками). На рис. 9б – линии уровня для второго варианта линзы.

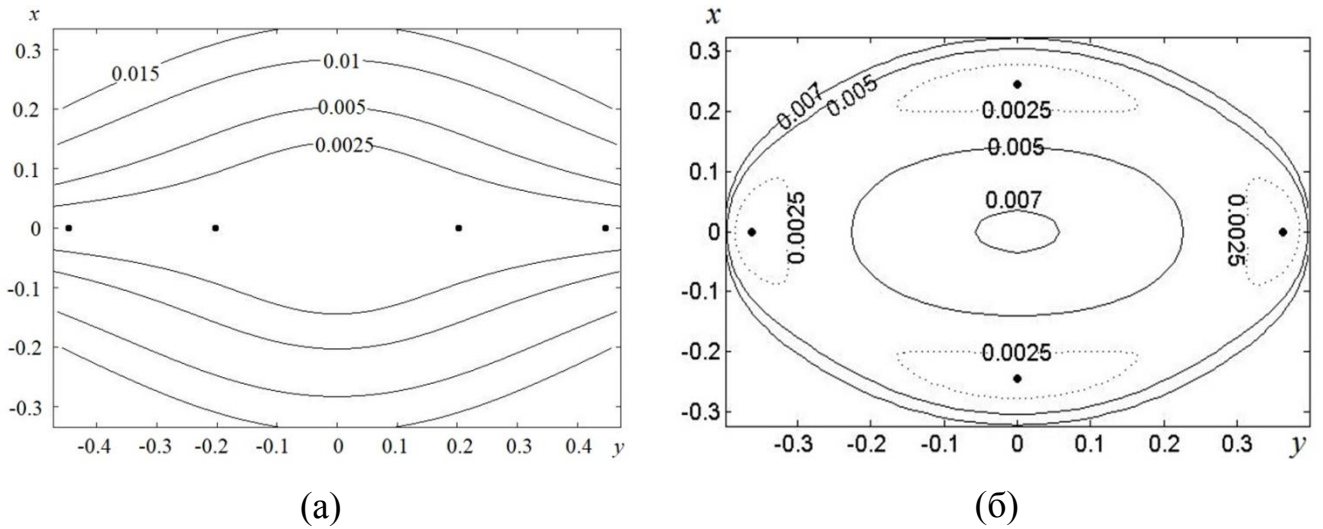


Рис. 9. Линии уровня СКА четырехфокальной линзы с тремя плоскостями симметрии

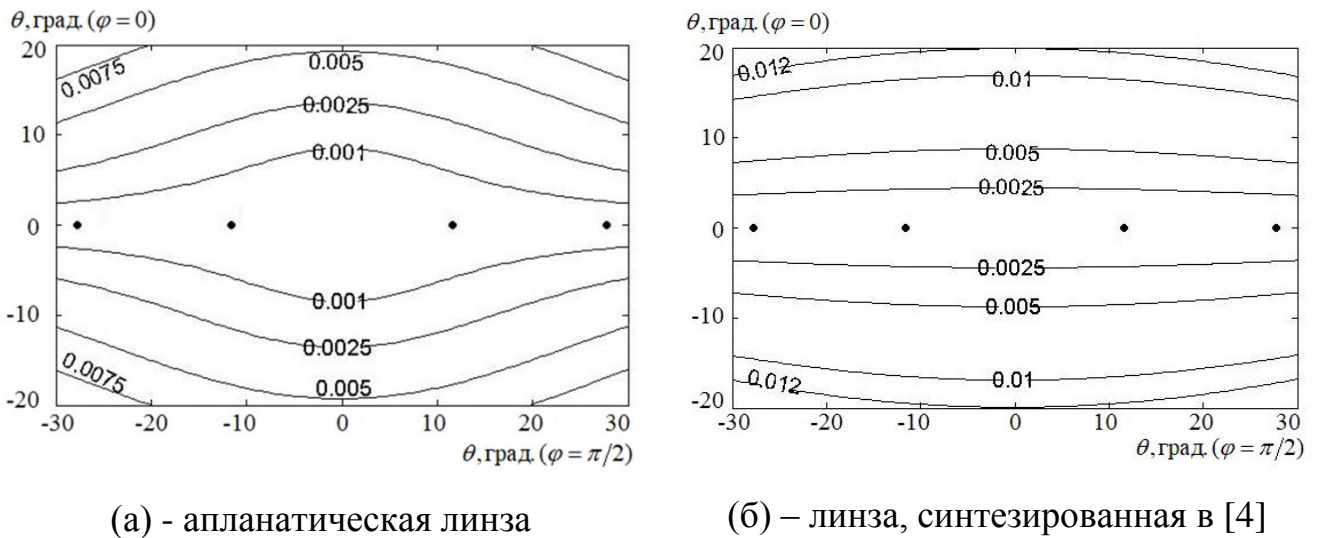


Рис. 10. Линии уровня СКА четырехфокальной линзы с двумя плоскостями симметрии и фокусами на бесконечности.

На рис. 10а показаны зависимости СКА от углов зрения четырехфокальной апланатической линзы с двумя плоскостями симметрии и фокусами на бесконечности. Для сравнения на рис. 10б приведены соответствующие характеристики четырехфокальной линзы, синтезированной в [4]. Как видно на рисунках при одинаковых уровнях СКА в плоскости yz ($\varphi = \pi/2$), уровень СКА синтезированной в данной работе линзы в плоскости xz ($\varphi = 0$) в два раза ниже.

В разделе 2.4 получено аналитическое решение задачи синтеза пятифокальной линзы с одной плоскостью симметрии, формирующей пять

плоских волн при различных вариантах расположения фокусов и, соответственно, направлениях плоских волн. Линзовые антенны такого типа позволяют формировать телесный угол зрения с заданными границами. В качестве первого примера синтезирована линза с пятью фокусами, расположенными на дуге окружности достаточно большого радиуса ($7.5 \cdot 10^{14}$), чтобы можно было сопоставить с линзой, синтезированной в [4]. На рис. 11 кривой 1 приведена зависимость СКА синтезированной пятифокальной линзы с одной плоскостью симметрии, кривой 2 – четырехфокальной линзы, синтезированной в [4], а кривой 3 – четырехфокальной линзы с двумя плоскостями симметрии и проекциями фокусов на плоскости xu ($\theta = \pi/2$) лежат в вершинах трапеции, синтезированной в конце раздела 2.3. Видно, что СКА у пятифокальной линзы примерно в 3 раза меньше, чем у четырехфокальной, синтезированной выше и в 5 раз меньше, чем у синтезированной в конце раздела 2.3.

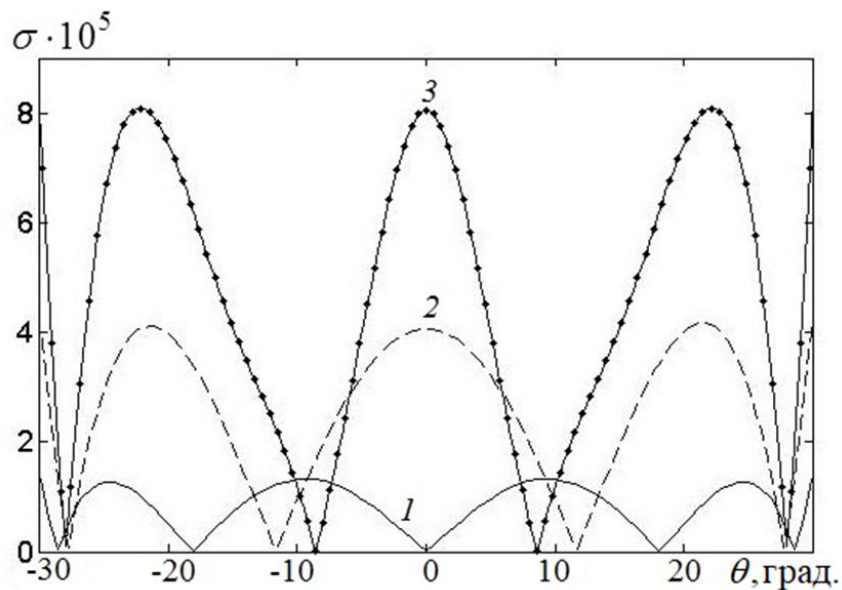


Рис. 11. Зависимости СКА пятифокальной и четырехфокальных линзы на фокальной линии.

В качестве второго примера синтезируем линзу с пятью фокусами, проекции которых на плоскость xu ($\theta = \pi/2$) лежат на эллипсе с осями: $a=0.2566$, $b=0.7529$. На рис. 12 показаны зависимости СКА от углов зрения на фокальной сфере, радиус которой ($R=1.377$) был найден в результате оптимизации.

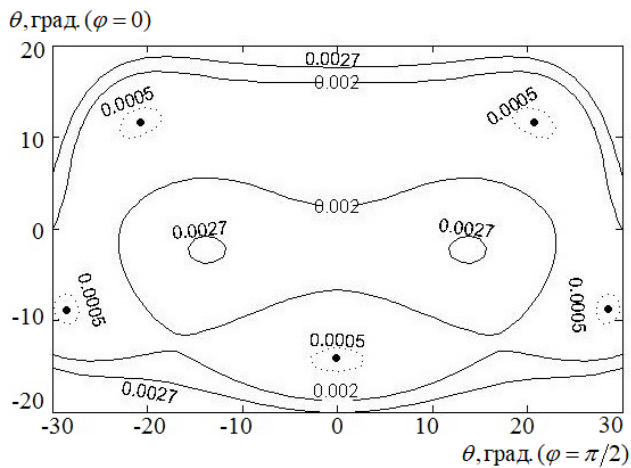


Рис. 12. Линии уровня СКА пятифокальной линзы с эллиптической проекцией фокальной линии

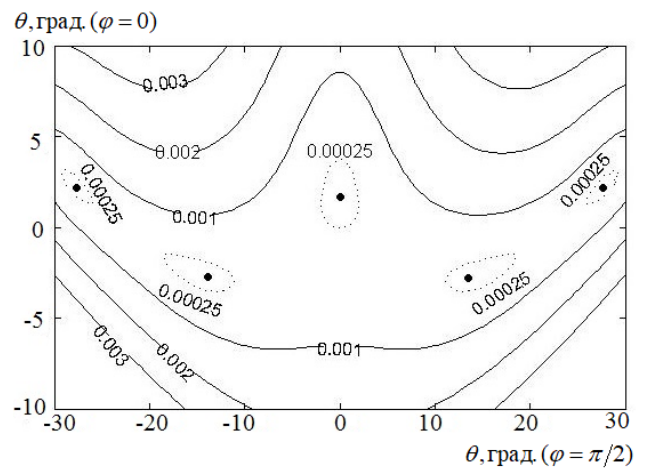


Рис. 13. Линии уровня СКА пятифокальной линзы с W - образной проекцией фокальной линии.

Вообще говоря, можно синтезировать линзы с произвольным расположением фокусов. В качестве еще одного примера синтезируем линзы с пятью фокусами, проекции которых на плоскость xu ($\theta = \pi/2$) расположены в вершинах буквы W. На рис. 13 показаны зависимости СКА от углов зрения синтезированной линзы на фокальной сфере, радиус которой ($R=6.27$) был найден в результате оптимизации.

В третьей главе рассмотрены двумерные задачи синтеза и анализа полифокальных диэлектрических линз.

В разделе 3.1 на основе подхода, предложенного в работах Б.Е.Кинбера с соавторами [7], развита методика точного решения задачи геометрооптического синтеза двумерных (цилиндрических) бифокальных диэлектрических линз (рис. 14), приведены примеры синтезированных линз и проведен анализ их aberrаций.

Были синтезированы три бифокальные линзы: 1) линза с симметричными фокальными кривыми; 2) линзы с отношением фокальных расстояний 1:3; 3) линза, формирующая на выходе плоские фронты. На рис. 15 кривой 1 приведена зависимость СКА диэлектрической бифокальной линзы с симметричными фокальными кривыми, кривой 2 – линзы с отношением фокальных расстояний 1:3, а кривой 3 – линзы, формирующей на выходе плоские фронты.

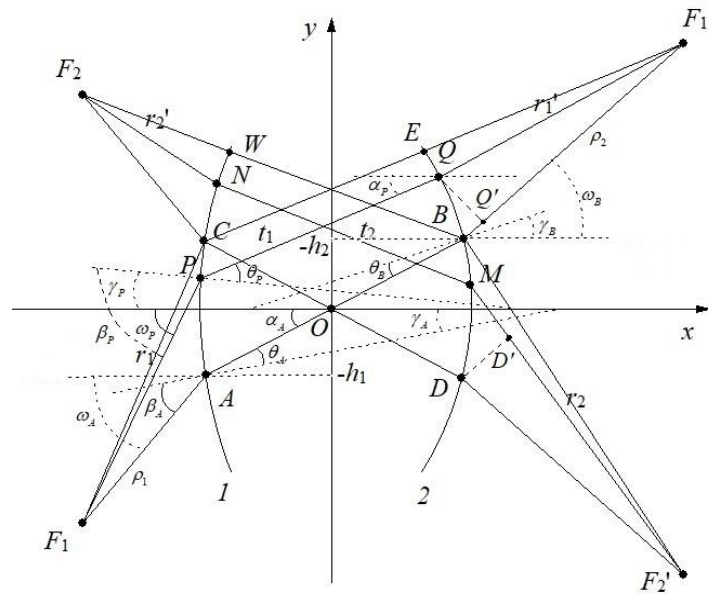


Рис. 14. Диэлектрическая бифокальная линза.

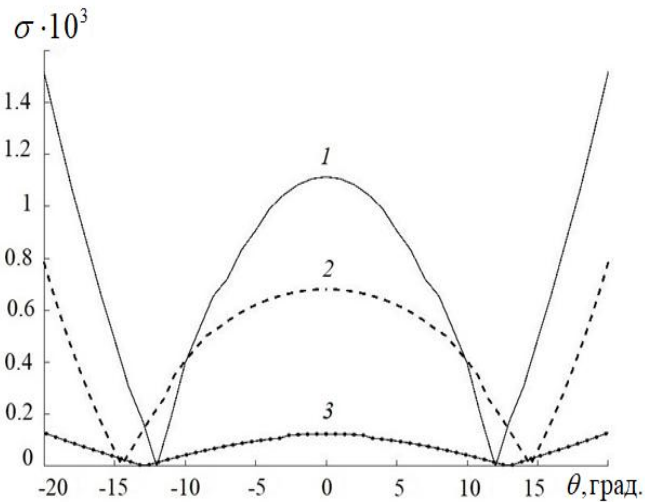


Рис. 15. Зависимость нормированной СКА от угла зрения диэлектрических бифокальных линз.

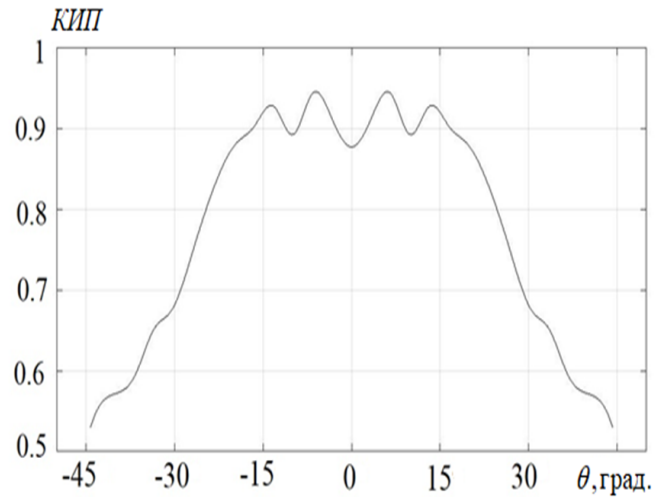


Рис. 16. Зависимость КИПа бифокальной линзовой антенны от угла сканирования.

Как видно на рис. 15, линза, формирующая на выходе плоские фронты, имеет минимальное значение СКА ($1.25 \cdot 10^{-4}$), а линза с симметричными фокальными кривыми - максимальное значение ($1.5 \cdot 10^{-3}$), хотя она является не только бифокальной, но и апланатической.

С использованием метода конечных элементов для планарной бифокальной линзовой антенны, формирующей два идеальных плоских фронта, проведен численный эксперимент, в результате которого получены характеристики

сканирования при перемещении рупорного облучателя по оптимизированной фокальной кривой. На рис. 16 приведена зависимость коэффициента использования поверхности (КИП) бифокальной линзовой антенны от угла сканирования. На рис. 17 показаны диаграммы направленности антенны на частоте 37.5 ГГц при перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой.

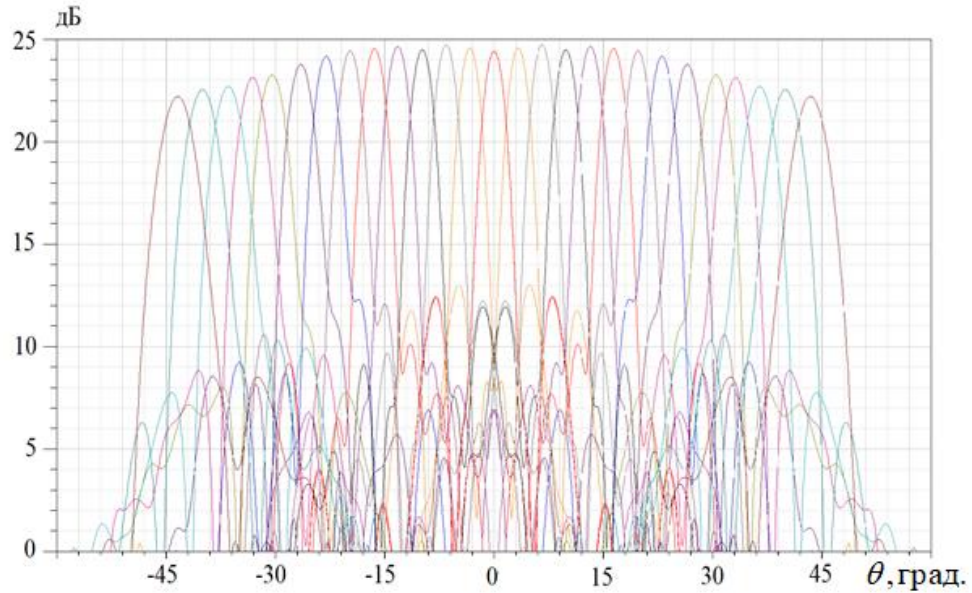


Рис. 17. Зависимость коэффициента усиления бифокальной линзовой антенны от угла сканирования.

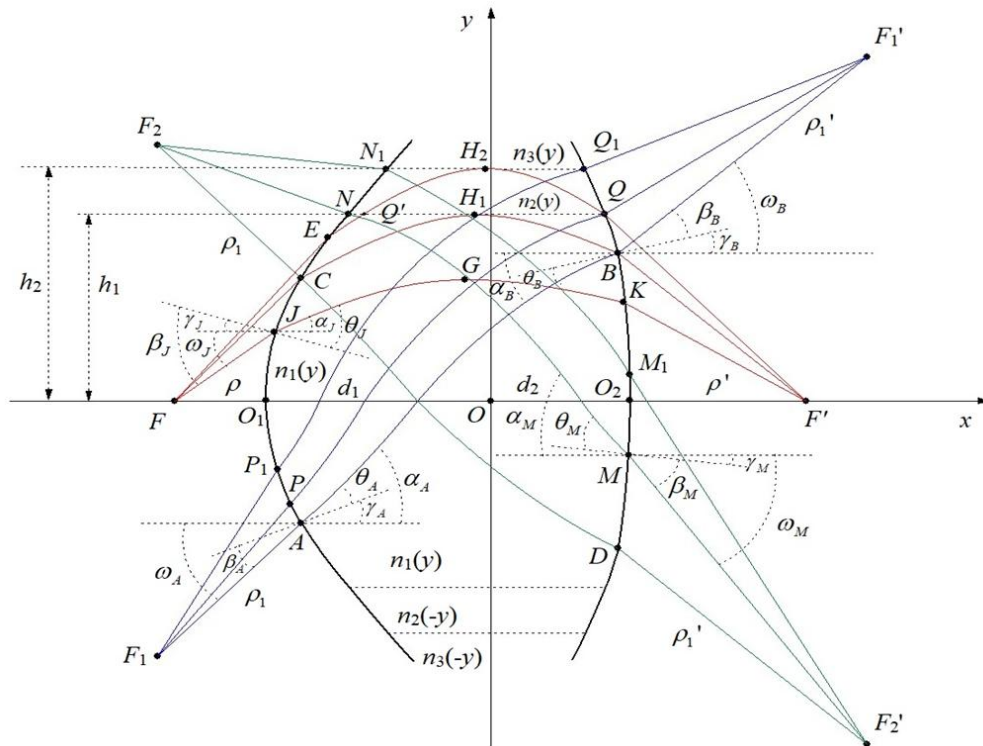


Рис. 18. Трехфокальная градиентная диэлектрическая линза.

В разделе 3.2 разработаны методика и алгоритмы приближенного решения задачи синтеза трехфокальных градиентных диэлектрических линз (рис. 18). Разработанная методика является дальнейшим развитием методики синтеза однородных бифокальных диэлектрических линз. Разработанные алгоритмы использованы для решения задачи синтеза трехфокальной линзы с симметричными фокальными линиями и линзы с тремя бесконечно удаленными фокусами. Алгоритмы обеспечивают точную фокусировку в двух фокусах и приближенную – в третьем (центральной) фокусе.

В качестве двух примеров применения развитой методики решены задачи синтеза трехфокальной градиентной линзы с симметричными фокальными кривыми и вогнуто-выпуклой линзы, формирующей три идеальных плоских волны. После нахождения поверхности и закона изменения коэффициента преломления внутри линзы проведен анализ СКА синтезированных линз.

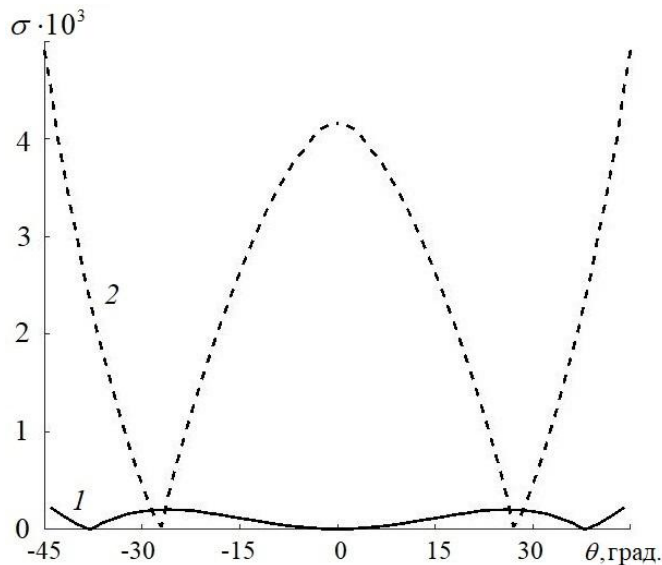


Рис. 19. Зависимость СКА от угла зрения линзы с симметричными фокальными кривыми.

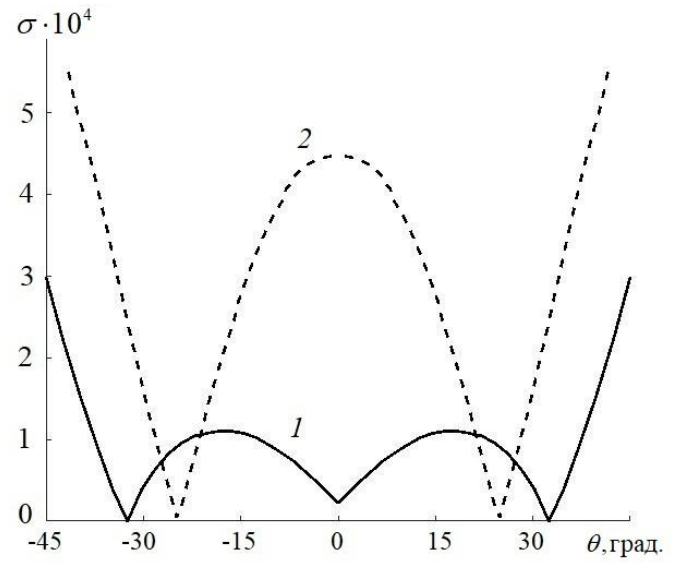


Рис. 20. Зависимость СКА от угла зрения линзы, формирующей плоские фронты.

Зависимость СКА трехфокальной градиентной диэлектрической линзы с симметричными фокальными кривыми от угла зрения показана на рис. 19 (кривая 1). Для сравнения кривой 2 на рисунке 19 приведена аналогичная зависимость для

бифокальной диэлектрической линзы с симметричными фокальными кривыми, синтезированной в разделе 3.1. Как видно на рис. 19, в угле зрения 80 градусов значение СКА ($2 \cdot 10^{-4}$) трехфокальной линзы в двадцать раз меньше, чем бифокальной линзы ($4.1 \cdot 10^{-3}$).

Зависимость величины СКА от угла зрения трехфокальной градиентной диэлектрической линзы, формирующей плоские фронты, показана на рис. 20 (кривая 1). Для сравнения кривой 2 на рисунке 20 приведена аналогичная зависимость для бифокальной диэлектрической линзы, формирующей плоские фронты, синтезированной в разделе 3.1. Как видно на рисунке, в угле зрения 80 градусов СКА трехфокальной линзы ($1.1 \cdot 10^{-4}$) в 4 раза меньше, чем бифокальной ($4.4 \cdot 10^{-4}$).

Сравнивая рис. 20 и рис. 19 видно, что у трехфокальной линзы, формирующей плоские фронты, имеет уровень СКА в два раза меньше, чем у трехфокальной линзы с симметричными фокальными кривыми.

В Заключение проведены основные результаты диссертации:

1. Решены задачи синтеза и анализа полифокальных линз с принудительным преломлением и произвольным положением фокусов, в том числе в явном виде получено решение задачи синтеза трехмерной линзы с тремя плоскостями симметрии и линзы с пятью фокусами, расположенными на бесконечности.

2. Исследованы двумерные бифокальные и трехфокальные линзы и показано, что минимальной величиной аберрации обладают линзы из линий одинаковой длины.

3. Развита методика и разработан алгоритм решения задачи геометрооптического синтеза с заданной точностью бифокальных цилиндрических диэлектрических линз.

4. Разработаны методика и алгоритм приближенного решения задачи геометрооптического синтеза трехфокальных цилиндрических градиентных диэлектрических линз.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы:

Развитые в работе методики и алгоритмы позволяют с заданной точностью решать задачи синтеза полифокальных линз с принудительным преломлением и бифокальных цилиндрических диэлектрических линз.

Методика решения задачи синтеза трехфокальных цилиндрических градиентных диэлектрических линз требует дальнейшего развития в части как повышения точности решения, так и рассмотрения других вариантов геометрии линз.

Список публикаций автора в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

- A1. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ полифокальных линз с принудительным преломлением и симметричными фокальными кривыми // РЭ. 2017. Т. 62. № 11. С. 1070-1077
- A2. Калошин В.А., Нгием Х.Д., Е. В. Фролова. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной волноводной трехфокальной линзо-зеркальной системы с принудительным преломлением // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf>
- A3. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ диэлектрических бифокальных линз // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/17/text.pdf>
- A4. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ трехфокальных градиентных диэлектрических линз // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/21/text.pdf>
- A5. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ полифокальных линз с принудительным преломлением // РЭ. 2018. Т. 63. № 10. С. 1051-1061.

Список публикаций автора в трудах конференций

- A6. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ полифокальных линз с принудительным преломлением и симметричными фокальными кривыми // III Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады. М.: ИРЭ РАН. 2015. С.201-206
- A7. Калошин В.А., Нгием Х.Д. Синтез и анализ полифокальных линз с принудительным преломлением .IV Всеросс. Микроволновой конф. Доклады.

М. ИРЭ им. Котельникова РАН. 2016. С. 406-409.
<http://jre.cplire.ru/jre/library/IV-mw-2016.pdf>

- А8. Нгием Х.Д. Полифокальные линзы с принудительным преломлением для радиообъективов и антенн. Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфо - коммуникационных технологий». Сер. Научные конференции, посвященные Дню радио М.: РНТОРЭС им. А.С.Попова. 2018. Вып.73. С. 56-60.

Список цитируемой литературы

1. Венецкий А.С., Калошин В.А. Распределение эйконала на поверхности осесимметричной диэлектрической линзы и минимизация aberrаций // РЭ. 2018. Т.63. №2. С. 144-156.
2. Ruse J. Wide-angle metal-plate optics // Proc. IRE. 1950. Vol. 38. No. 1. P. 53-59
3. Rotman W., Turner R. F. Wide-angle microwave lens for line source applications // IEEE Trans. on Anten. and Propag. 1963. Vol. AP-11. No. 6. P. 623-632.
4. Rappaport M., Zaghloul I. Optimized Three Dimensional Lenses for Wide-Angle Two- Dimensional Scanning // IEEE Trans. 1985. Vol. AP-33. No. 11. P. 1227-1236.
5. Климов К. Н., Фирсов - Шибяев Д.О., Перфильев В. В. Геометрическая интерпретация синтеза квазиоптической распределительной системы для многолучевых фазированных антенных решеток //РЭ. 2015. Т. 60. № 3. С. 254-281.
6. Rappaport M., Mason J. A five focal point three-dimensional bootlace lens with scanning in two planes // IEEE Ant. Prop. URSI Sym. Digest. July 1992. P. 1340-1343.
7. Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеблин В.И. Теория трехмерных бифокальных антенн // РЭ. 1983. Т. №8. С. 1509-1517
8. Кинбер Б.Е., Классен В.И., Шишлов А.В., Тоболев А.К. Гибридные и полифокальные антенны. Обзор // Антенны. 1987. Вып. 34. С. 3-24