

На правах рукописи



ЛЕ ДОАН ТРИНЬ

**ПЛАНАРНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ С ЧАСТОТНЫМ
СКАНИРОВАНИЕМ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Долгопрудный – 2020

Работа выполнена на кафедре радиотехники и систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «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	Коган Борис Лазаревич , доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры Радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ" Шишлов Александр Васильевич , кандидат технических наук, начальник антенного отдела ПАО «Радиофизика»
Ведущая организация	ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент» (Ростов-на-Дону)

Защита состоится «25» сентября 2020 г., в 11-30 на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 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/LeDoanTrin/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

И.о. ученого секретаря диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Л.Е. Назаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее время резко возрос интерес к исследованиям планарных многолучевых антенн на основе волноводно-щелевых антенных решеток с квазиоптическими диаграммо-образующими системами. Этот интерес обусловлен тем, что наряду с традиционными приложениями волноводно-щелевых антенн в радиолокационных системах, появляются новые, в частности, в области ближней радиолокации и радиовидения, а также систем связи новых поколений. Еще одна причина возросшего интереса – появление новых технологий изготовления волноводно-щелевых антенн, в частности, SIW технологий. При этом возрастающие требования в приложениях и внутренняя логика развития науки требуют улучшения параметров этого класса антенн, в первую очередь, расширения сектора углов частотного сканирования и многолучевой диаграммы направленности.

Исследования волноводно-щелевых антенн проводились в течение длительного времени. Основная масса исследований посвящена антеннам с излучением минус первой гармоники, при этом в большинстве из них используются двойные продольные щели на периоде в широкой стенке волновода в качестве излучающих элементов.

Сектор частотного сканирования антенны вытекающей волны, излучающей минус первую пространственную гармонику шире, чем у аналогичной антенны, излучающей нулевую гармонику. Этот сектор может достигать 180° , однако лишь в случае заполнения волновода материалом с очень высокой диэлектрической проницаемостью, что приводит к увеличению веса, стоимости и тепловых потерь. В работе [1] был предложен другой путь расширения сектора частотного сканирования: за счет выбора параметров антенны вытекающей волны, при которых обеспечивается режим излучения как основной (нулевой), так и минус первой гармоники пространственного спектра с непрерывным сектором углов частотного сканирования в диапазоне рабочих частот антенны, определяемых полосой одномодового режима волновода. Антенна выполнена в виде заполненного

диэлектриком прямоугольного металлического волновода с периодически расположенными парными поперечными щелями в широкой стенке. Исследование частотной зависимости коэффициента усиления (КУ) и коэффициента использования поверхности (КИП) антенны в работе [2] показало заметное снижение этих величин в значительной части частотного диапазона, обусловленное наличием частотных резонансов коэффициента отражения и сильной частотной дисперсией постоянной затухания вытекающей волны, что приводит к неравномерному амплитудному распределению вдоль антенны и, соответственно, значительному снижению величины КУ и КИП. Таким образом, представляет интерес задача исследования возможности расширения сектора частотного сканирования волноводно-щелевых антенн и антенных решеток за счет подавления частотных резонансов коэффициента отражения и выравнивания частотной характеристики постоянной вытекания.

Для формирования многолучевой диаграммы направленности в планарных волноводно-щелевых антенных решетках (ВЩАР) используется диаграммообразующая система (ДОС) на основе планарного волновода с расположенными в волноводе облучателями. В простейшем случае в качестве фокусирующего элемента ДОС используется параболическое зеркало. Однако при смещении облучателя из фокуса параболы возникают фазовые aberrации, которые ограничивают угол зрения антенны. Для уменьшения aberrаций используют бифокальные и трехфокальные линзовые, двухзеркальные и зеркально-линзовые ДОС. Использование линзовых и зеркально - линзовых ДОС с принудительным преломлением и приводит к усложнению конструкции и увеличению потерь ВЩАР. Поэтому представляет интерес задача уменьшения aberrаций и, в результате, расширение углового сектора (угла зрения) многолучевой диаграммы направленности при использовании полифокальных зеркальных и зеркально-линзовых ДОС с диэлектрическими линзами.

В работах Б.Е. Кинбера с соавторами [3] предложена методика решения задачи синтеза бифокальной двухзеркальной системы, преобразующей две расходящиеся цилиндрические волны в сходящиеся или плоские. Методика основана на задании

начального участка поверхности одного из зеркал и последовательного нахождения других участков этого и другого зеркала. Для получения гладкого решения в указанных работах приведены условия сопряжения с требованием непрерывности функций, описывающих участки поверхности, а также их производных на границах участков. Однако приведенных в указанных работах условий недостаточно для получения корректного решения задачи геометро - оптического синтеза. Кроме того, в этих работах отсутствует ответ на вопрос о выборе начального участка.

Из изложенного выше следует, что задачи расширения угловых секторов частотного сканирования и многолучевой диаграммы направленности планарных многолучевых ВЩАР с однозеркальными, двухзеркальными и зеркально-линзовыми ДОС, является актуальными как с научной, так и прикладной точек зрения.

Цель и задачи исследования Целью диссертационной работы является разработка и исследование планарных ВЩАР с широкими угловыми секторами частотного сканирования и многолучевой диаграммы направленности.

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

1. Разработка линейных волноводно-щелевых антенн с широким сектором частотного сканирования;
2. Построение электродинамических моделей и проведение исследований линейных волноводно-щелевых антенн с широким сектором частотного сканирования;
3. Изготовление экспериментального образца и проведение измерений параметров линейной волноводно-щелевой антенны с широким сектором частотного сканирования;
4. Синтез бифокальных и трехфокальных планарных ВЩАР на основе зеркальных и зеркально-линзовых систем;
5. Анализ аберраций бифокальных и трехфокальных планарных ВЩАР;
6. Построение электродинамических моделей и проведение исследований многолучевых планарных ВЩАР.

Методы исследования В работе использованы: приближенная аналитическая

теория, численные и численно-аналитические методы, а также физический эксперимент.

Новые научные результаты:

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

1. Разработана и исследована линейная волноводно-щелевая антенна с четырьмя продольными щелями на периоде и широким сектором частотного сканирования;

2. Разработана и исследована волноводно-щелевая антенна с тремя поперечными щелями на периоде, излучением двух пространственных гармоник и полным сектором частотного сканирования (180^0);

3. Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза двухзеркальных бифокальных ДОС планарных ВЩАР;

4. Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза однозеркальных бифокальных, двухзеркальных и зеркально-линзовых трехфокальных планарных ВЩАР;

5. Синтезированы бифокальные и трехфокальные планарные ВЩАР на основе однозеркальных, двухзеркальных и зеркально-линзовых систем;

6. С использованием приближенной теории и численного эксперимента проведены исследования бифокальных и трехфокальных планарных ВЩАР на основе однозеркальных, двухзеркальных и зеркально-линзовых систем.

Практическая значимость работы

1. Разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец волноводно-щелевой антенны с четырьмя продольными щелями и сектором частотного сканирования 58 градусов;

2. Разработана конструкция волноводно-щелевой антенны с тремя поперечными щелями и сектором частотного сканирования 180 градусов;

3. Разработаны конструкции бифокальных планарных ВЩАР с углом зрения многолучевой диаграммы более 70 градусов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Использование четырех продольных щелей в широкой стенке прямоугольного металло-диэлектрического волновода вытекающей волны позволяет расширить полосу рабочих частот и сектор частотного сканирования;
2. Использование трех поперечных щелей в широкой стенке прямоугольного металло-диэлектрического волновода вытекающей волны позволяет подавить частотные резонансы коэффициента отражения, уменьшить частотную дисперсию постоянной вытекания и повысить коэффициент усиления антенны;
3. Формирование спадающего к краям амплитудного распределения в апертуре волноводно-щелевой антенны позволяет расширить полосу рабочих частот при заданном уровне коэффициента использования поверхности (КИП);
4. Использование эллиптического зеркала вместо параболического и криволинейных линий расположения центров щелей в планарных ВЦАР позволяет расширить угловой сектор многолучевой диаграммы направленности;
5. Двухзеркальные и зеркально-линзовые бифокальные ДОС обеспечивают более широкий угловой сектор многолучевой диаграммы направленности ВЦАР по сравнению с однозеркальной бифокальной ДОС;
6. Двухзеркальные и зеркально-линзовые трехфокальные ДОС с криволинейными линиями расположения центров щелей обеспечивают более широкий угловой сектор многолучевой диаграммы направленности ВЦАР по сравнению с бифокальными ДОС с прямолинейными линиями расположения центров щелей.

Апробация работы Основные результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях: Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфо - коммуникационных технологий». Сер. Научные конференции, посвященные Дню радио. Москва. 2018.; VI Всероссийской Микроволновой конференции, г. Москва. 2018 г. Международной конференции «2020 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications», Moscow. 2020.

Публикации По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них входящих в международные базы данных - 1, а также в трудах конференций – 3. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 112 страниц.

Личный вклад В совместных работах с сотрудниками лаборатории электродинамики композиционных сред и структур ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН соискателю принадлежит разработка и изготовление экспериментального образца волноводно-щелевой антенны с четырьмя продольными щелями на периоде, проведение измерений его параметров (совместно Е.В. Фроловой), разработка и исследование волноводно-щелевой антенны с тремя поперечными щелями на периоде, разработка алгоритма и синтез бифокальной двухзеркальной диаграммообразующей системы, разработка алгоритма и синтез бифокальной однозеркальной и трехфокальных волноводно-щелевых антенных решёток, построение электродинамических моделей с использованием приближенной теории и метода конечных элементов многолучевых планарных бифокальных и трехфокальных волноводно-щелевых антенных решёток, а также проведение исследований их параметров.

Структура и объем работы Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и Списка литературы из 37 наименования. Диссертационная работа изложена на 109 страницах, содержит 64 рисунка и 2 таблицы.

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 трех глав.

В первой главе рассмотрены линейные волноводно-щелевые антенны с излучением минус первой пространственной гармоники и двух (минус первой и нулевой) пространственных гармоник.

В разделе 1.1 исследованы возможности расширения рабочей полосы и,

соответственно, сектора частотного сканирования волноводно-щелевой антенны с излучением минус первой пространственной гармоники в виде интегрированного в подложку волновода (SIW) с различным количеством и различным расположением щелей на периоде в широкой стенке.

Рассмотрим ячейку (период) интегрированного в подложку волновода с четырьмя продольными щелями (рис. 1). Размер узкой стенки волновода равен 1.6мм, остальные размеры и параметры оптимизации в низкочастотной части миллиметрового диапазона показаны на рисунке. Для обеспечения согласования при излучении по нормали были выбраны четыре набора параметров ячеек, в которых коэффициенты отражения минимальны на частоте 30 ГГц.

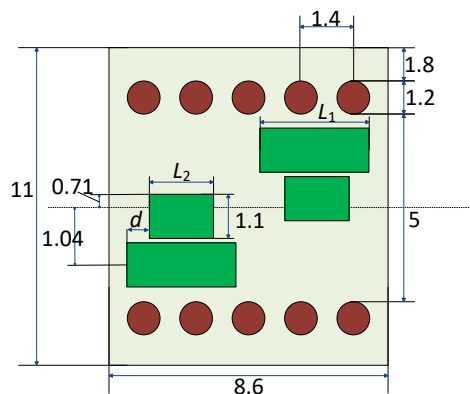


Рис. 1. Ячейка с четырьмя продольными щелями.

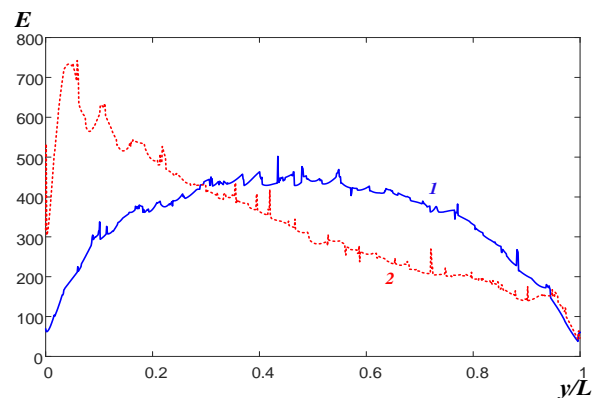


Рис. 2. Распределения амплитуды электрического поля вдоль антенны.

Используя известную формулу, связывающую постоянную затухания и распределение мощности вытекающей волны вдоль волновода [4], и методику [5], найдена зависимость длины щелей для синусоидального и экспоненциального амплитудного распределения излученного поля вдоль волновода. Эти распределения, рассчитанные методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде Ansys HFSS на расстоянии 8.4мм от излучающей поверхности на частоте $f = 28\text{ГГц}$ приведены на рис. 2 сплошной (1) и пунктирной (2) кривыми, соответственно.

На рис. 3, 4 в тех же обозначениях приведены соответствующие частотные зависимости коэффициентов отражения и диаграммы направленности (ДН) антенны

на частотах (1 – 22, 2 – 23, 3 – 24, 4 – 25, 5 – 26, 6 – 27, 7 – 28, 8 – 29, 9 – 30, 10 – 31, 11 – 32, 12 – 33, 13 – 34, 14 – 35, 15 – 36, 16 – 37, 17 – 38 ГГц), соответственно. На рис. 4 видно, что усиление антенны с синусоидальным амплитудным распределением с увеличением частоты спадает медленнее, чем в случае экспоненциального распределения.

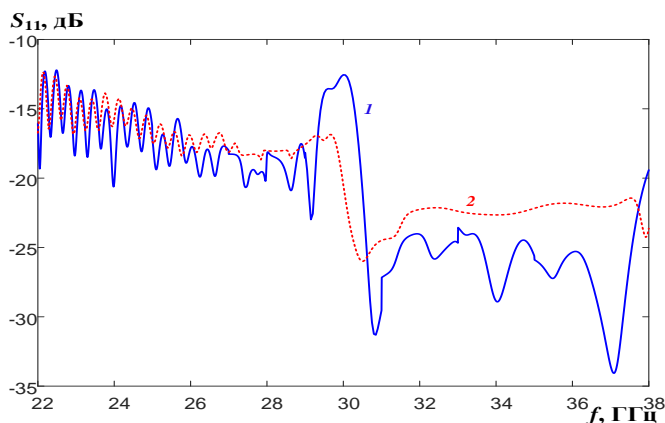


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от частоты.

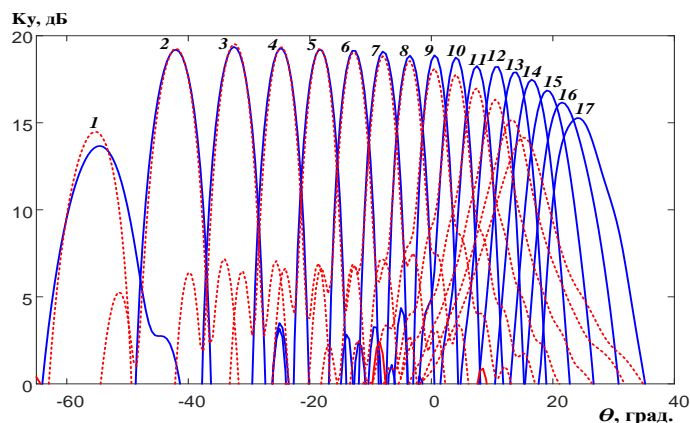


Рис. 4. Диаграммы направленности на 17 частотах.



Рис. 5. Экспериментальный образец

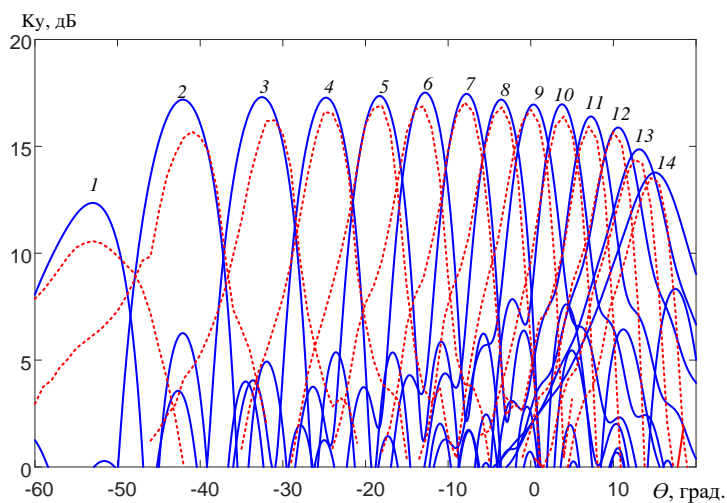


Рис. 6. Диаграммы направленности.

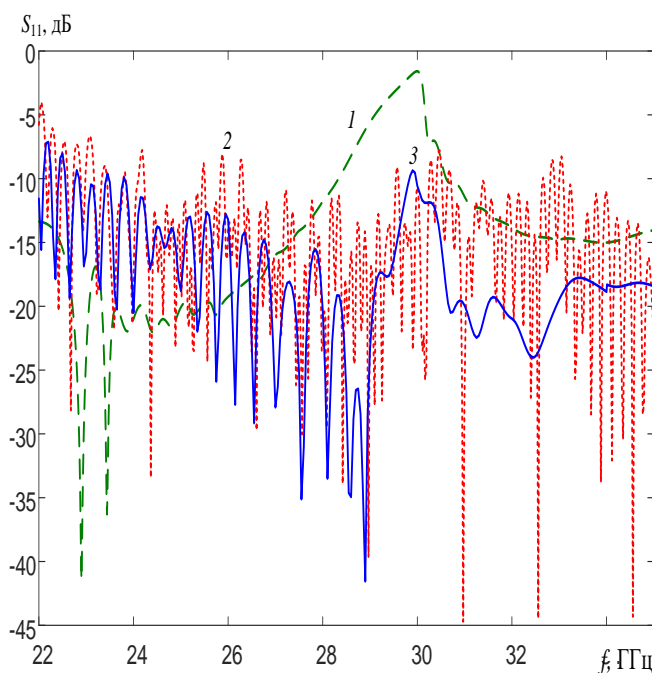


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

На рис. 5 приведено фото экспериментального образца волноводно-щелевой антенны длиной 187 мм с экспоненциальным распределением. На рис. 6

представлены ДН экспериментального образца антенны на частотах (1-23, 2-24, 3-25, 4-26, 5-27, 6-28, 7-29, 8-30, 9-31, 10-32, 11-33, 12-34, 13-35 ГГц), а на рис. 7 - зависимости коэффициентов отражения от частоты. Сплошными кривыми на рисунках показаны результаты моделирования, штриховыми - измерений. Как видно на рис. 7, результаты измерений коэффициента отражения выше расчетных на 3-5 дБ, а области частот 31 - 33 ГГц – на 5-7 дБ. При этом коэффициент отражения на частоте излучения по нормали (30 ГГц) не превышает уровень – 10 дБ в отличие от классической конструкции антенны с двумя продольными щелями на периоде (пунктирная кривая). Различие между результатами моделирования и измерений КУ экспериментального образца не превышает 1дБ, за исключением области низких частот (менее 30 ГГц). Отличие результатов измерений коэффициентов отражения и усиления от результатов моделирования можно объяснить наличием коаксиально-волноводного перехода, отражение от которого не учитывалось при моделировании, а также неточностью изготовления экспериментального образца.

В разделе 1.2 рассмотрена волноводно-щелевая антенна с излучением минус первой и нулевой пространственных гармоник. Антенна содержит три поперечные щели на периоде и двухслойное диэлектрическое заполнение с прямоугольными канавками в верхнем слое (рис. 8). Диэлектрическая проницаемость верхнего слоя $\epsilon = 2.25$, а нижнего – 9.8. Геометрия щелей выбрана из требования минимума коэффициента отражения на частотах $f_1 = 30.14$ ГГц и $f_2 = 41.03$ ГГц, которые соответствуют двум частотным резонансам антенны. На рис. 9 представлены результаты моделирования частотной зависимости коэффициента отражения антенны длиной 1.1 м (240 периодов). Вертикальными штриховыми линиями показаны границы частотных областей, соответствующих разным режимам излучения (1 – нулевая гармоника, 2 - -1 гармоника, 3 – переходная зона). На рис. 10 приведена зависимость частоты и КИП антенны от угла излучения. На рис. 11 показаны ДН антенны на частотах (1 – 25, 2 – 26, 3 – 27, 4 – 28, 5 – 28.6, 6 – 30.4, 7 – 31, 8 – 32, 9 – 34, 10 – 38, 11 – 40, 12 – 45 ГГц). На рис. 10, 11 видно, что антенна эффективно излучает во всем секторе углов от -90 до 90 градусов, за исключением узкой переходной зоны от одного режима к другому (20 – 26 градусов), где усиление

падает на 10 дБ.

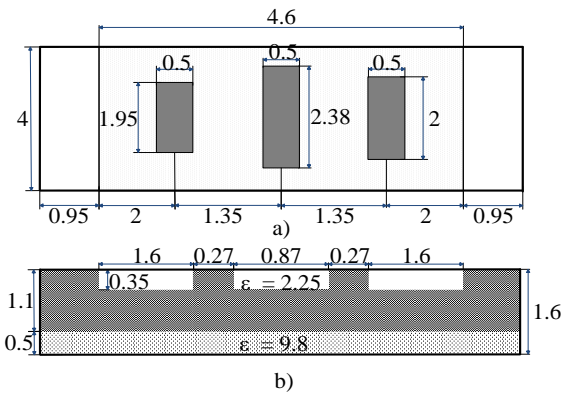


Рис. 8. Ячейка АВВ.

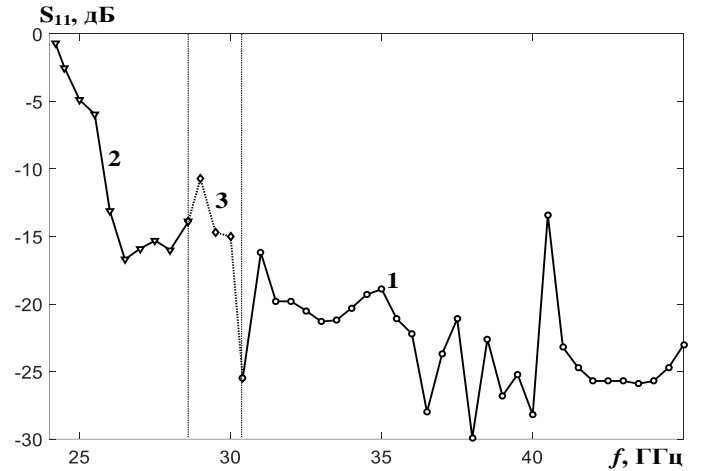


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента отражения.

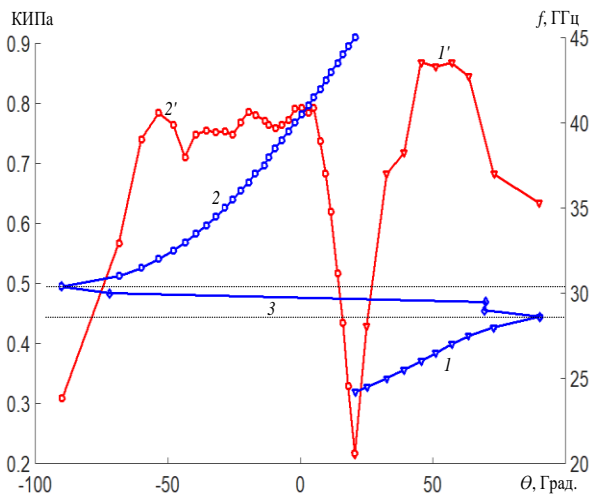


Рис. 10. Зависимости частоты и КППа от угла излучения.

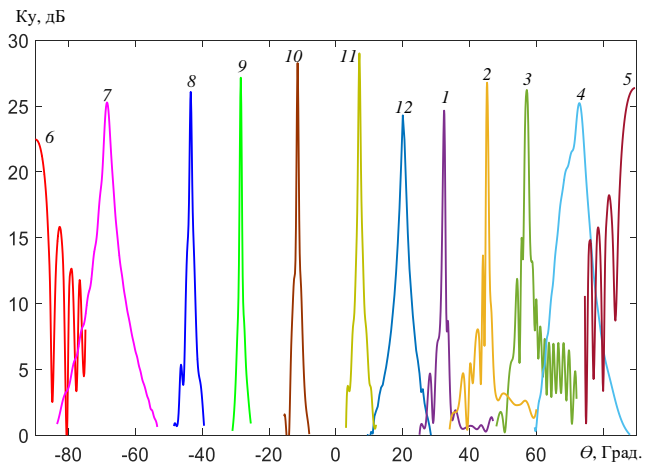


Рис. 11. Зависимости КУ в E - плоскости от угла на частотах.

При этом уровень КПП в большей части сектора сканирования более 0.65.

Второй главе рассмотрены планарные многолучевые ВЦАР с бифокальными ДОС. Конструкции ВЦАР показаны на рис. 12.

В разделах 2.1, 2.2 описана методика и проведен геометрооптический синтез бифокальной двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС, соответственно. Отличие

от методики, предложенной в работах Б.Е. Кинбера [3], заключается в том, что кроме условий непрерывности поверхности зеркал и их производных, также удовлетворяются условия непрерывности вторых производных. Это обеспечивает непрерывность отраженных от зеркал геометрооптических полей.

На рис. 13 показаны зависимости величины нормированной среднеквадратической aberrации (СКА) от угла зрения для синтезированных двухзеркальной (1) и зеркально-линзовой (2) ДОС. Как видно на рисунке, в угле зрения 60° СКА зеркально-линзовой ДОС и двухзеркальной ДОС близки.

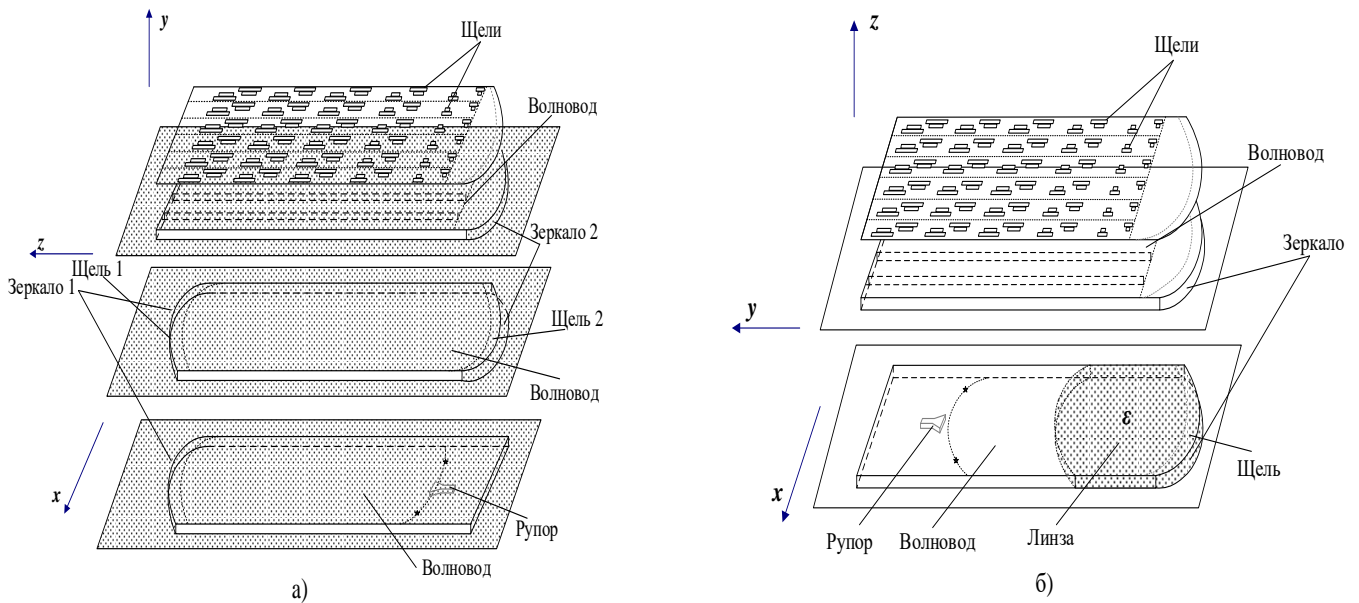


Рис. 12. ВЦАР с двухзеркальной (а) и зеркально-линзовой (б) ДОС.

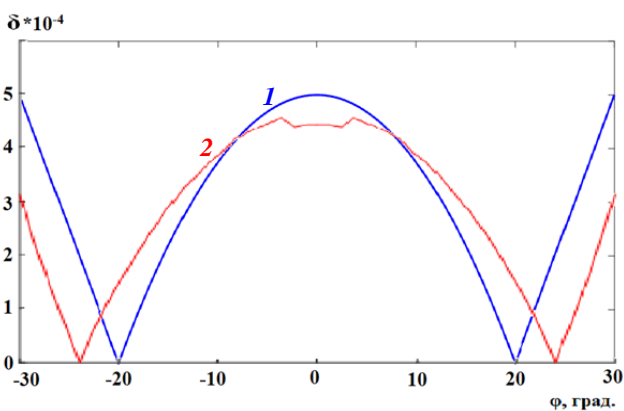


Рис. 13. Зависимость СКА от угла зрения.

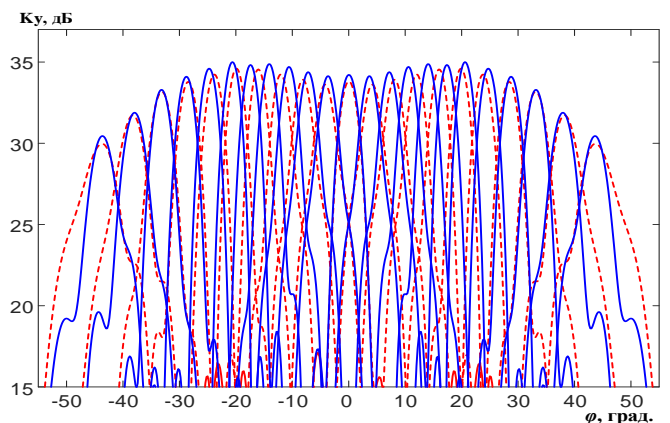


Рис. 14. Диаграммы направленности в азимутальной плоскости.

В разделе 2.3 проведен анализ характеристик излучения ВЦАР с бифокальной

двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС. В качестве элемента решеток в обоих случаях использована волноводно-щелевая антенна с четырьмя продольными щелями на широкой стенке, исследованная в первой главе.

На рис. 14, 15 показаны, соответственно, ДН лучей ВЦАР в азимутальной плоскости при дискретном перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой на частоте излучения по нормали (30 ГГц) и в угломестной плоскости на 17 частотах (1 – 22, 2 - 23, 3 - 24, 4 - 25, 5 - 26, 6 - 27, 7 - 28, 8 - 29, 9 - 30, 10 - 31, 11 - 32, 12 - 33, 13 - 34, 14 - 35, 15 - 36, 16 - 37, 17 – 38 ГГц) при центральном положении облучателя (штриховая кривая - для зеркально-линзовой системы, сплошная - для двухзеркальной системы).

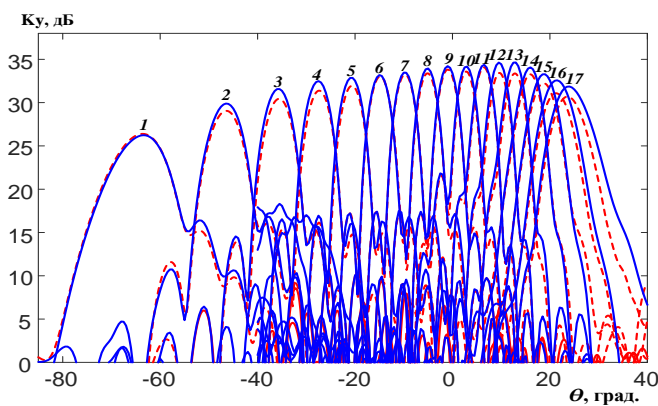


Рис. 15. Диаграммы направленности в угломестной плоскости на частотах.

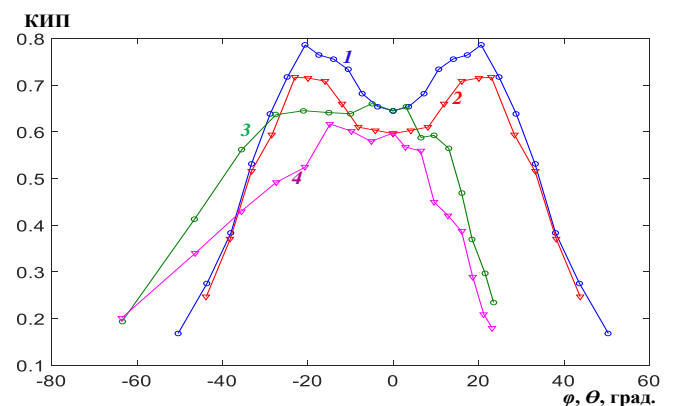


Рис. 16. Зависимости КИП от азимута и угла места.

На рис. 16 приведены зависимости КИП ВЦАР от угла в азимутальной плоскости при перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой на частоте 30 ГГц (1 - для двухзеркальной ДОС, 2 - для зеркально-линзовой ДОС) и в угломестной плоскости при изменении частоты от 22 до 38 ГГц и центральном положении облучателя (3 - для двухзеркальной ДОС, 4 - для зеркально-линзовой ДОС). Как видно на рисунке, по уровню КИП = 0.5 сектора частотного сканирования в угломестной плоскости антенной решетки с двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС равны, соответственно, 58° и 40° . При этом углы зрения многолучевой диаграммы в азимутальной плоскости для этих решеток почти одинаковы и примерно равны 70° .

В третьей главе рассмотрены многолучевые планарные ВЦАР с ограниченным сектором частотного сканирования.

Во второй главе в качестве ДОС планарной ВЦАР использованы бифокальные системы, а линии расположения центров щелей являются прямыми. При этом качество фокусировки луча антенной решетки не зависит от частоты, а сектор частотного сканирования определяется элементом ВЦАР – линейной антенны. Если использовать форму линий расположения центров щелей как дополнительную степень свободы, можно увеличить число точек идеальной фокусировки при перемещении облучателя по фокальной линии. При этом форма синтезированных линий расположения центров щелей зависит от частоты и при отклонении от частоты, для которой проведен синтез, качество фокусировки луча ВЦАР будет ухудшаться. Именно такой подход развит в данной главе, хотя он и приводит к ограничению сектора частотного сканирования.

В разделе 3.1 показана возможность построения бифокальной ВЦАР на основе простой двухслойной конструкции с эллиптическим зеркалом (рис. 17). Проведен синтез и анализ бифокальной решетки, а также исследованы характеристики сканирования антенны при перемещении облучателя по фокальной кривой.

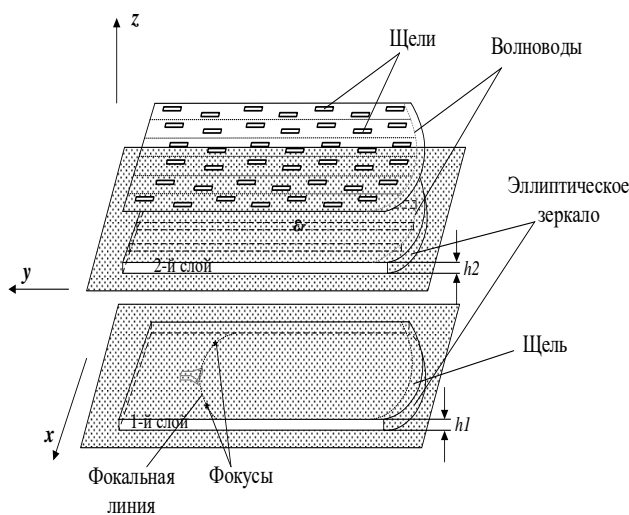


Рис. 17. Конструкция бифокальной ВЦАР.

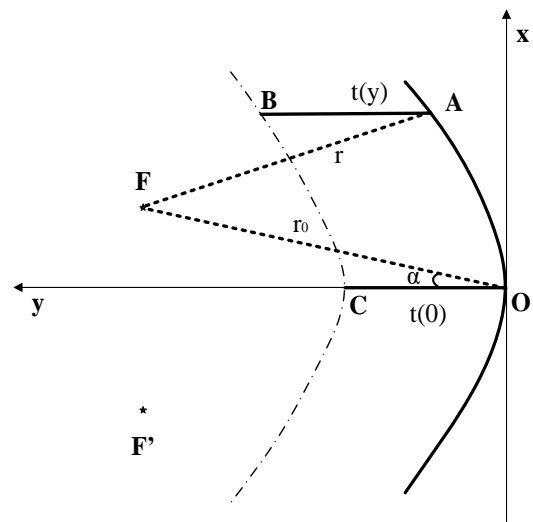


Рис. 18. К синтезу формы зеркала и положения щелей

Рассмотрим задачу синтеза формы зеркала (формы щели) и линий положения

центров щелей в декартовой системе координат x, y, z (рис. 18) с целью обеспечения синфазности излучения под заданным углом β к нормали плоскости решетки (оси Z) при двух положениях источника (фазового центра облучателя). Для этого необходимо равенство всех эйконалов (оптических путей) от источника – до фронта плоской волны через центр соответствующей щели. Потребуем, чтобы эйконалы любоголуча будут равны эйконалу центрального луча. В результате, получаем:

$$n(t(0) - t(y)) = \frac{\sqrt{(r_0 \cos \alpha - y)^2 + (x + r_0 \sin \alpha)^2} - r_0 - y \cos \beta - x \sin \alpha}{1 - \cos \beta} \quad (1)$$

где n – показатель преломления диэлектрического заполнения, остальные параметры понятны из рис.18.

Для лучей, исходящих из фокуса F' , расположенного симметрично точке F относительно оси Oy , нетрудно получить аналогичное уравнение, которое будет отличаться только знаком угла α :

$$n(t(0) - t(y)) = \frac{\sqrt{(r_0 \cos \alpha - y)^2 + (x - r_0 \sin \alpha)^2} - r_0 - y \cos \beta + x \sin \alpha}{1 - \cos \beta} \quad (2)$$

Вычитая уравнение (2) из уравнения (1) и преобразовывая, получаем квадратное уравнение, которое нетрудно преобразовать к виду:

$$\frac{(y - r_0 \cos \alpha)^2}{(r_0 \cos \alpha)^2} + \frac{x^2}{r_0^2} = 1 \quad (3)$$

Уравнение (3) определяет профиль зеркала и является уравнением эллипса. При задании значений r_0 и α формула (3) определяет функцию $y = f(x)$, которая не зависит от величины β . Складывая уравнения (1) и (2), находим линии положения центров щелей:

$$t = t_0 + \frac{y \sin \beta}{1 - \sin \beta} \quad (4)$$

На рис. 19 приведены результаты расчета линий положения центров щелей по формуле (4) для $\beta = 60^0(1)$, $90^0(2)$, и $120^0(3)$.

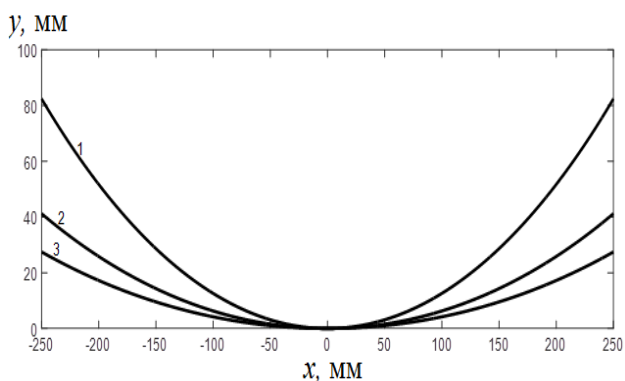


Рис. 19. Линии центров щелей в зависимости от частоты.

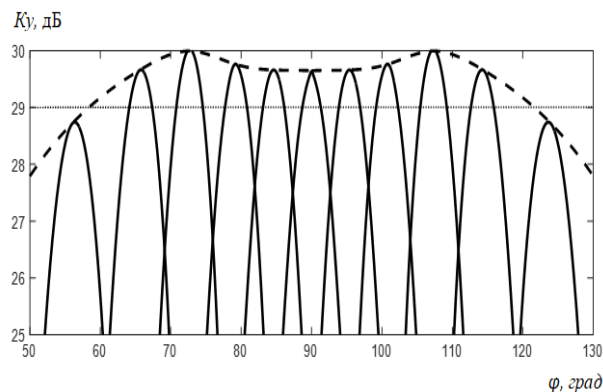


Рис. 20. Диаграммы направленности при перемещении облучателя.

На рис. 20 приведены результаты численного моделирования ДН бифокальной решётки на частоте 10 ГГц при различных положениях фазового центра рупора на фокальной кривой (сплошные линии). Как видно на рисунке линия максимумов ДН (штриховая) пересекает линию -1 дБ (пунктирная) на границах сектора 60 градусов.

В разделах 3.2, 3.3 разработаны методика и алгоритм приближенного решения задачи синтеза трехфокальной двухзеркальной (рис. 21а) и зеркально-линзовой (рис. 21б) ВЦАР и синтезированы образцы таких решеток.

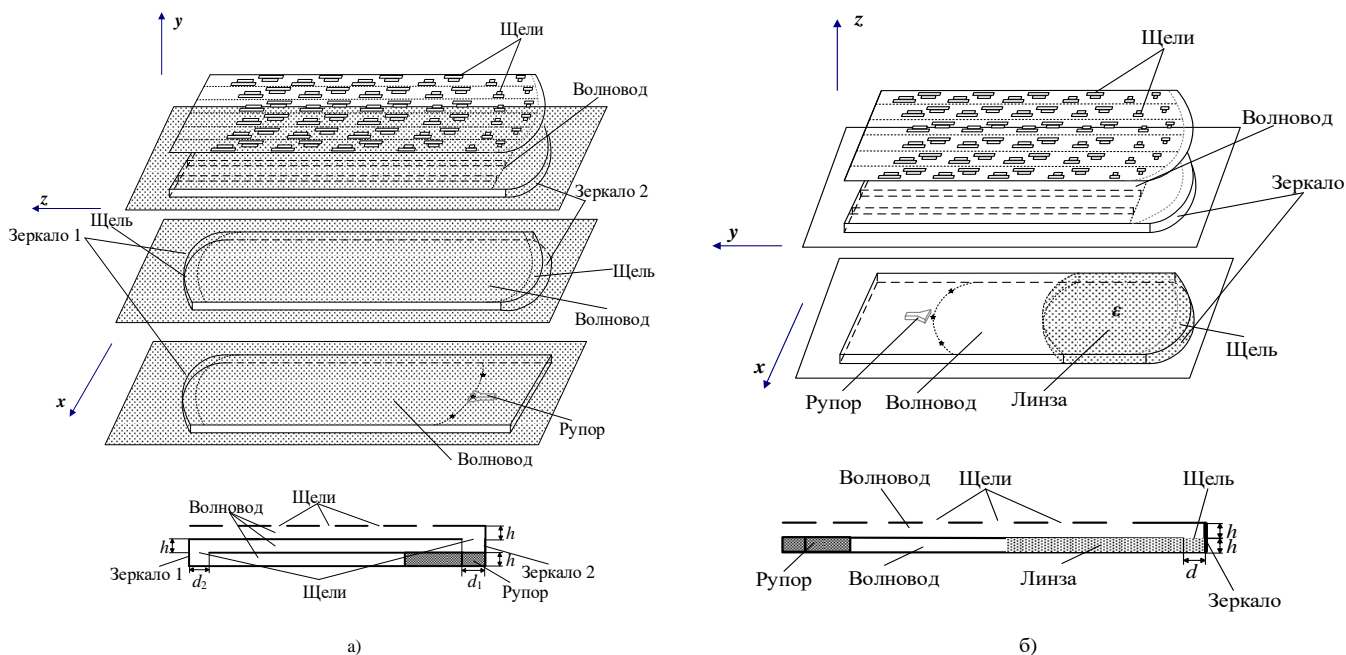


Рис. 21. Трехфокальные ВЦАР (а) – двухзеркальная, (б) – зеркально-линзовая.

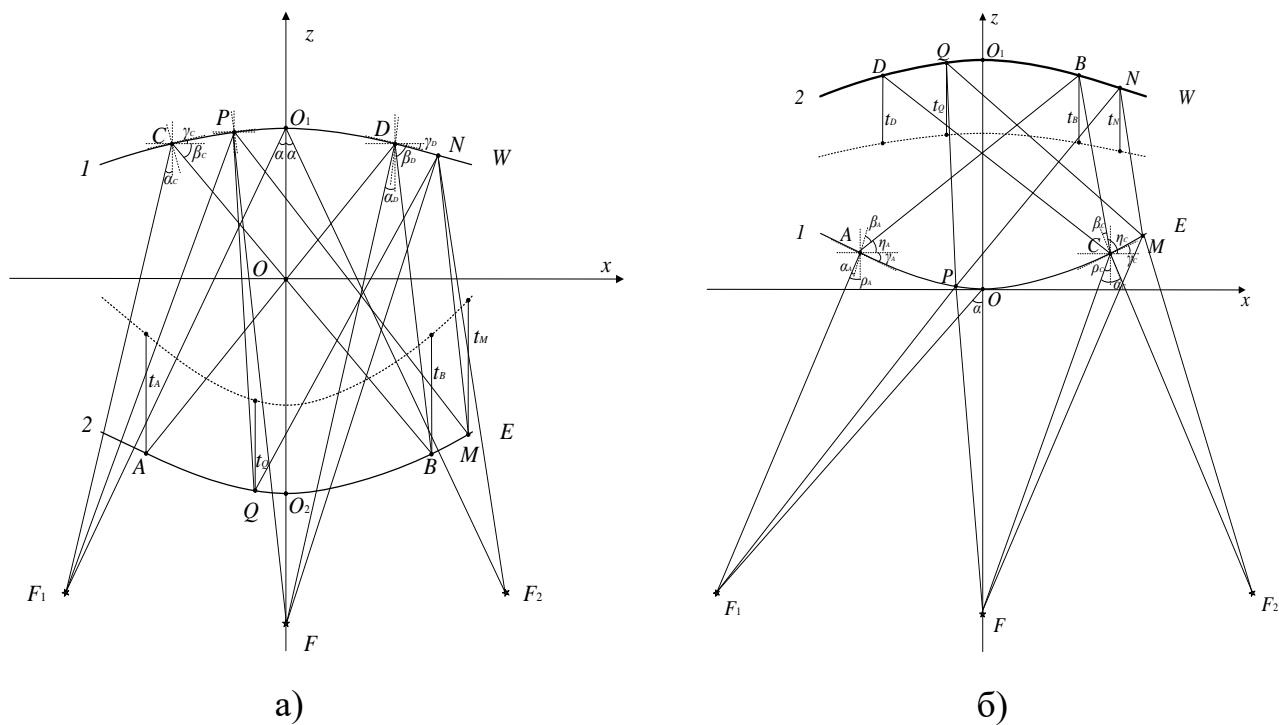


Рис. 22. К синтезу трехфокальных ВЩАР.

В разделе 3.4 проведена оптимизация и сравнительный анализ синтезированных антенных решеток.

На рис. 23 показаны зависимости СКА бифокальных и трехфокальных антенных решеток от угла зрения (азимутального угла ϕ). Как видно на рисунке, в угле зрения 80 градусов значение СКА трехфокальной двухзеркальной волноводно-щелевой антенной решетки (1) в 1.5 раза меньше, чем зеркально-линзовой (2), в 7 раз меньше, чем однозеркальной (3) и в 4 раза меньше, чем двухзеркальной бифокальной (4).

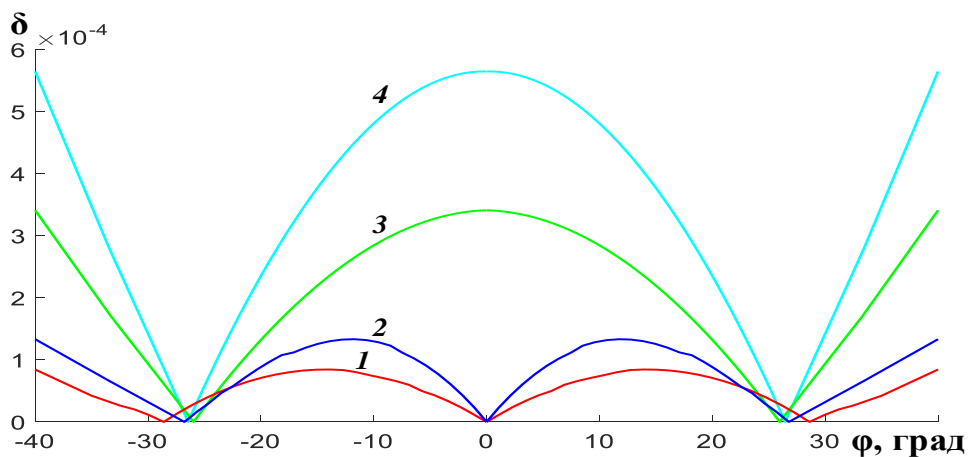


Рис. 23. Зависимости СКА от угла зрения.

Для вычисления КИП и ДН антенных решеток, используем найденные величины СКА и формулу:

$$D(\phi, \theta) = D_0(\phi, \theta) \sum_{i=1}^N A_i \exp(ik(L_i - L_0)), \quad (5)$$

где $D(\phi, \theta)$ – ДН ВЦАР, $D_0(\phi, \theta)$ – ДН линейной антенны, $A_i = \cos(\eta x_i/D)$ – амплитуда моды в линейной антенне с номером i , η – коэффициент, зависящий от уровня облучения кромок зеркала, x_i – координата центра линейной антенны с номером i , D – ширина ВЦАР, N – количество линейных антенн в ВЦАР; L_i – эйконалы лучей до щели на первой линии с координатой x , соответствующей положению оси i -го волновода; L_0 – длина соответствующего эйконала для центрального волновода.

На рис. 24, 25 кривыми 1, 2 показаны диаграммы направленности лучей, соответственно, двухзеркальной и зеркально-линзовой трехфокальных ВЦАР в азимутальной плоскости и зависимость КИП при перемещении облучателя по фокальной линии, рассчитанные на частоте 30 ГГц (частота излучения по нормали) по описанной методике. Для сравнения кривыми 3, 4 на рис. 25 показаны аналогичные зависимости для ВЦАР с бифокальной двухзеркальной ДОС и однозеркальной бифокальной ВЦАР, соответственно.

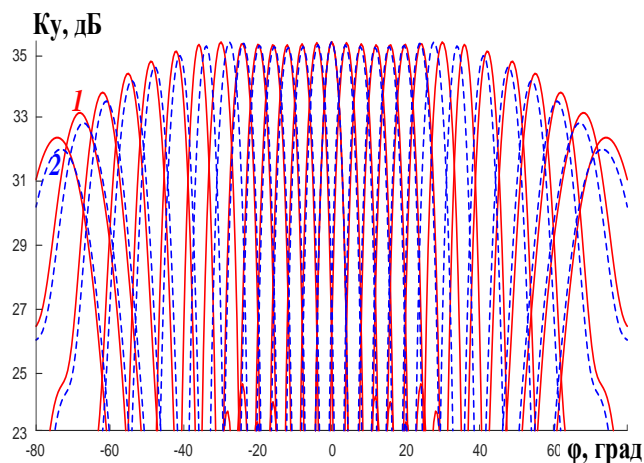


Рис. 24. Зависимость КУ решеток от угла зрения.

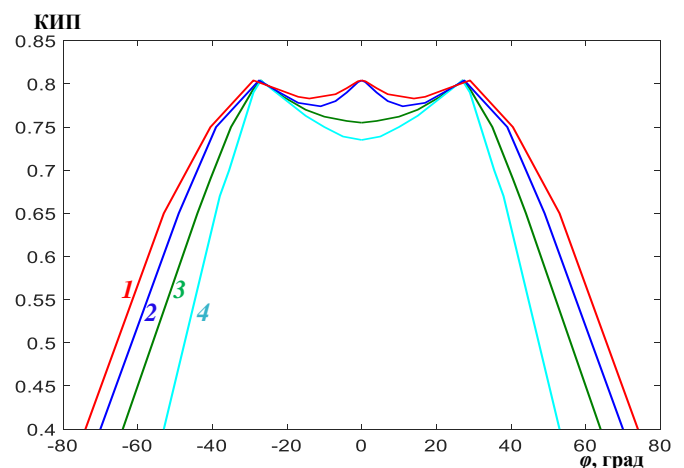


Рис. 25. Зависимость КИП решеток от угла зрения.

Несмотря на то, что все антенные решетки были синтезированы и оптимизированы по минимуму СКА в угле зрения 80 градусов, на рис. 25 видно, что

угол зрения трехфокальных решеток по уровню КИП = 0.5 - более 130 градусов, бифокальной двухзеркальной – более 110 градусов, а бифокальной однозеркальной – более 80 градусов. Это угол может быть увеличен еще больше при допущении снижения величины КИП до уровня 0.5 при малых углах отклонения от нормали.

На рис. 26, 27 приведены ДН на частотах (1 – 22, 2 - 23, 3 - 24, 4 - 25, 5 - 26, 6 - 27, 7 - 28, 8 - 29, 9 - 30, 10 - 31, 11 - 32, 12 - 33, 13 - 34, 14 - 35, 15 - 36, 16 - 37, 17 – 38 ГГц, сплошные кривые - трехфокальная двухзеркальная решетка, пунктирные кривые - трехфокальная зеркально-линзовая решетка) и зависимости КИП от угла частотного сканирования (угла места θ) (1- трехфокальная двухзеркальная, 2 - трехфокальная зеркально-линзовая, 3 - бифокальная двухзеркальная, 4 – бифокальная однозеркальная) для положения источника на осисимметрии ВЦАР, рассчитанные по описанной выше методике.

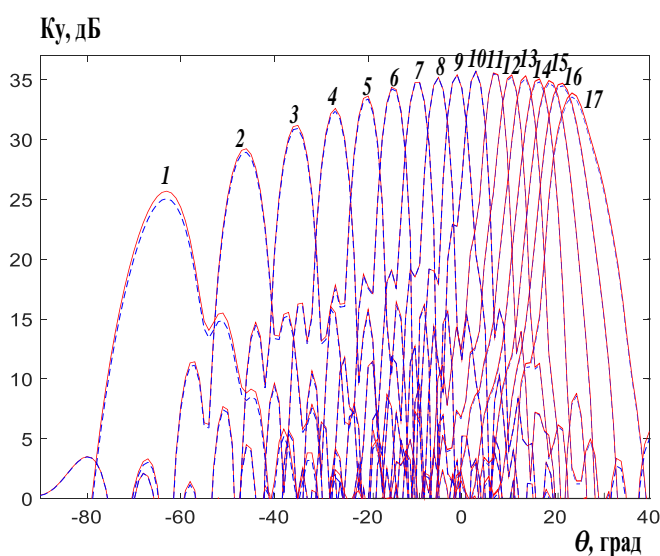


Рис. 26. Зависимость коэффициента усиления от угла места

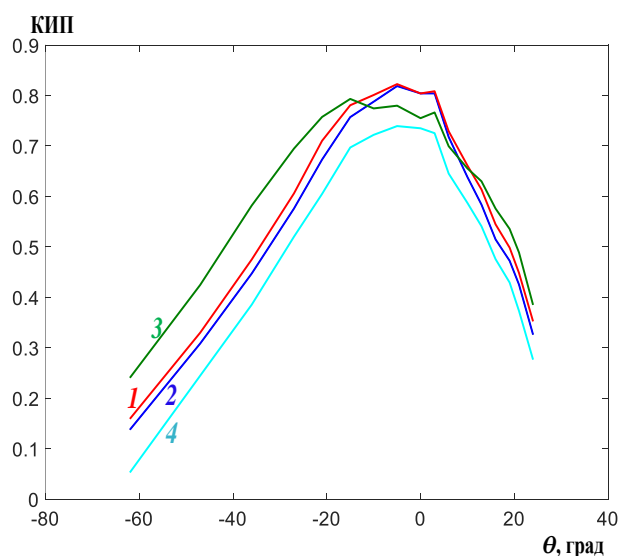


Рис. 27. Зависимости величины КИП от угла места

На рисунках видно, что сектор частотного сканирования по уровню КИП = 0.5 бифокальной двухзеркальной антенной решетки – более 60 градусов, трехфокальных антенных решеток – около 50 градусов, бифокальной однозеркальной антенной решетки – около 30 градусов. Таким образом, несмотря на ограничение полосы рабочих частот из-за частотно-зависимого синтеза планарных ВЦАР с кривыми линиями расположения центров щелей, полоса частот остается

достаточно широкой.

В Заключении приведены основные результаты диссертации:

1) Разработана и исследована волноводно-щелевая антенна с излучением минус первой пространственной гармоники, четырьмя продольными щелями на периоде и сектором частотного сканирования 58 градусов.

2) Разработана и исследована волноводно-щелевая антенна с излучением нулевой и минус первой пространственной гармоникой, тремя поперечными щелями на периоде и сектором частотного сканирования 180 градусов.

3) Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза двухзеркальной бифокальной ДОС многолучевой планарной ВЦАР.

4) Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза бифокальной планарной ВЦАР на основе однозеркальной системы.

5) Развита методика и разработан алгоритм точного решения задачи геометрооптического синтеза трехфокальных ВЦАР на основе двухзеркальных и зеркально-линзовых систем.

6) С использованием приближенной теории и численного моделирования исследованы многолучевые ВЦАР с бифокальными ДОС.

7) С использованием численно-аналитической методики исследованы планарные многолучевые трехфокальные планарные ВЦАР.

8) Изготовлен экспериментальный образец и проведены измерения характеристик согласования и излучения волноводно-щелевой антенны с четырьмя продольными щелями на периоде и сектором частотного сканирования 58 градусов.

В диссертационной работе не учитывается влияние взаимной связи между линейными волноводно-щелевыми решетками на характеристики планарной

многолучевой антенной решетки, не рассмотрены задачи разработки и исследования облучающей системы. Эти вопросы требуют дальнейшего рассмотрения.

Список публикаций автора в журналах, входящих в перечень ВАК РФ

- A1. Калошин В.А., Ле Д.Т. Синтез и анализ бифокальных двухзеркальных систем // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/13/text.pdf>
- A2. Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е. В. Бифокальная планарная волноводно-щелевая решётка // РЭ. 2019. Т. 64 № 8 С. 768 – 774.
- A3. Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е. В. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/9/text.pdf>
- A4. Калошин В.А., Ле Д.Т., Ви У.Н., Многолучевые волноводно-щелевые антенные решётки с бифокальными диаграммо - образующими системами и широким сектором частотного сканирования// Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/13/text.pdf>
- A5. Калошин В.А., Ле Д.Т. Трехфокальные волноводно-щелевые антенные решётки // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/4/text.pdf>
- A6. Калошин В.А., Ле Д.Т. Волноводно-щелевая антенна с сектором частотного сканирования 180 градусов // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/1/text.pdf>

Список публикаций автора в трудах конференций

- A7. Калошин В.А., Ле Д.Т. Фролова Е. В. Бифокальная планарная волноводно-щелевая решётка. Труды Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфо - коммуникационных технологий». Сер. Научные конференции, посвященные Дню радио М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. Май. 2018. С. 66-70.
- A8. Калошин В.А., Ле Д.Т., Нгием Х. Д. Планарные полифокальные антенны. VI Всеросс. Микроволной конф. Доклады. М. ИРЭ им. Котельникова РАН. Ноябрь. 2018. С. 218-222.

А9. Калошин В. А., Калиничев В. И., Ле Д.Т. Линейные волноводно-щелевые антенные решетки с широким сектором частотного сканирования. VI Всеросс. Микроволной конф. Доклады. М. ИРЭ им. Котельникова РАН. 2018. Ноябрь. С. 223-227.

Список цитируемой литературы

1. Калошин В.А., Калиничев В.И. Линейная волноводно-щелевая антенная решетка с 180 - градусным сектором частотного сканирования // РЭ. 2019. Т. 64. № 7. С. 678.
2. Калошин В.А., Калиничев В.И. Характеристики излучения линейной волноводно-щелевой решетки с широким сектором частотного сканирования // Журнал радиоэлектроники 2019. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/7/text.pdf>
3. Классен В.И., Кинбер Б.Е., Шишлов А.В., Тоболев А.К. Гибридные и полифокальные антенны. Обзор // Антенны. 1987. Вып. 34. С. 3-24.
4. Уолтер К., Антенны бегущей волны / под ред. А. Ф. Чаплина. – М.: Энергия. – 1970.
5. Калиничев В. И. Анализ и синтез волноводно-щелевой антенны с заданным амплитудным распределением // Журнал радиоэлектроники. 2015. №12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/8/text.html>