

На правах рукописи



НГУЕН ТХЕ ТХАНЬ  
**СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОЙ  
ПОЛЯРИЗАЦИИ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Долгопрудный – 2025

Работа выполнена в Центре образовательных программ 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 **Бобрешов Анатолий Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Электроника ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

**Лаврецкий Евгений Изидорович**, кандидат технических наук, главный специалист АО «НИИ Точных Приборов»

Ведущая организация **ПАО «Радиофизика».**

Защита состоится «20» июня 2025 г., в 13.00, 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/Nguyen2/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Кузьмин  
Лев Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Расширение полосы частот антенн позволяет увеличить разрешающую способность радиолокационных систем, повысить скорость передачи данных в системах связи и управления. Поэтому разработка широкополосных и, в том числе, сверхширокополосных (СШП) антенн является актуальной задачей.

Следует отметить, что большинство известных СШП антенн (ТЕМ рупоры, биконические антенны, щелевые рупоры, логопериодические антенны) не обладают высокой направленностью. Для повышения направленности используют антенные системы, которые можно разделить на два типа: квазиоптические системы и антенные решетки.

В квазиоптических антенных системах СШП антенна с небольшой направленностью используется в качестве облучателя, а в качестве фокусирующих элементов используются линзы или зеркала.

Для антенных систем линейной поляризации, всенаправленных в одной плоскости, в качестве облучателя используются, как правило, биконические антенны, а в качестве фокусирующего элемента – линзы различного типа. Альтернативный подход заключается в использовании СШП линейных решеток линейной поляризации.

В квазиоптических СШП антенных системах линейной поляризации направленных в двух плоскостях в качестве облучателя используются, как правило, рупоры различного типа, а в качестве фокусирующих элементов – зеркала. Альтернативный подход заключается в использовании СШП цилиндрических или плоских антенных решеток.

Несмотря на значительное количество работ, направленных на разработку и исследование СШП антенных систем, их параметры, в первую очередь, коэффициент использования поверхности (КИП), как правило, ниже, чем у более узкополосных аналогов.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является улучшение характеристик СШП антенных систем линейной поляризации, в первую очередь, величины КИП.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1) Разработка электродинамических моделей, исследование и оптимизация параметров поликонической антенны с однородной и градиентной диэлектрическими линзами.

2) Изготовление экспериментального образца и проведение измерений параметров сверхдиапазонной поликонической антенны с градиентной диэлектрической линзой.

3) Разработка электродинамических моделей, исследование и оптимизация параметров однополяризованного и двухполяризованного облучателя на основе рупора с диэлектрической вставкой.

5) Разработка электродинамической модели и исследование характеристик однополяризованной и двухполяризованной офсетной однозеркальной антенной системы.

7) Разработка электродинамической модели, исследование и оптимизация параметров осесимметричной двухзеркальной антенной системы с облучающей системой на основе градиентной линзы Микаэляна.

8) Разработка электродинамической модели, исследование и оптимизация параметров офсетной двухзеркальной антенной системы с облучателем в виде рупорно-линзовой антенны.

9) Разработка электродинамической модели, исследование и оптимизация параметров антенной решетки щелевых рупоров и синфазного многоканального делителя мощности.

**Методы исследования.** В диссертационной работе для анализа антенных систем и их элементов использованы численные методы электродинамического моделирования: конечных элементов (МКЭ), конечных разностей во временной области (МКРВО) и метод моментов (ММ), для синтеза - метод геометрической оптики (ГО), для измерения характеристик излучения - метод дальней зоны.

**Новые научные результаты.** В диссертационной работе получены

следующие новые научные результаты:

1) Разработана и исследована поликоническая антенна с однородной диэлектрической линзой.

2) Разработана и исследована поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой.

3) Разработаны и исследованы однополяризационная и двухполяризационная однозеркальная антенная система с облучателями на основе металло-диэлектрических рупоров.

4) Разработана и исследована двухполяризационная осесимметричная двухзеркальная антенная система с облучателем на основе градиентной линзы Микаэляна.

5) Разработана и исследована двухполяризационная офсетная двухзеркальная антенная система с облучателем в виде рупорно-линзовой антенны.

6) Разработана и исследована плоская синфазная 64-элементная антенная решетка щелевых рупоров с системой питания.

**Практическая значимость работы.** Результаты работы, имеющие практическую значимость:

1. Разработаны СШП антенные системы с улучшенными характеристиками по сравнению с мировыми аналогами.

2. Разработана конструкция, изготовлен и исследован экспериментальный образец сверхдиапазонной поликонической антенны с диэлектрической градиентной линзой.

Полученные результаты могут быть использованы в СШП системах связи.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанная и исследованная поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой Микаэляна обеспечивает эффективность излучения не менее 0.5 в полосе частот более 40:1.

2. Разработанная и исследованная поликоническая антенна с однородной диэлектрической линзой обеспечивает эффективность излучения не менее 0.8 в полосе частот более 44:1.

3. Разработанная и исследованная однополяризационная офсетная однозеркальная антенная система с облучателем в виде пирамидального рупора с диэлектрической вставкой обеспечивает КИП более 0.6 в полосе частот более 2:1.

4. Разработанная и исследованная двухполяризационная офсетная однозеркальная антенная система с облучателем в виде четырехреберного круглого рупора с диэлектрической вставкой обеспечивает КИП более 0.5 в полосе частот более 5:1.

5. Разработанная и исследованная двухполяризационная осесимметричная двухзеркальная антенная система с облучателем на основе линзы Микаэляна обеспечивает КИП более 0.5 в полосе частот более 5:1.

6. Разработанная и исследованная двухполяризационная офсетная двухзеркальная антенная система с облучателем на основе однородной линзы обеспечивает КИП более 0.5 в полосе частот более 9:1.

7. Разработанная и исследованная синфазная антенная решетка с системой питания КИП более 0.8 в полосе частот более 20:1.

**Достоверность** результатов обеспечена использованием трех апробированных методов численного моделирования (ММ, МКЭ и МКРВО), а также сопоставлением результатов моделирования и измерений экспериментального образца.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены на Международных конференциях «Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2023», г. Москва, 2023 г. и «Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2024», г. Москва, 2024 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 7 – в статьях, статьях в журналах, индексируемых в RSCI и рекомендованных ВАК, 2 - в трудах международных конференций. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 100 страниц.

**Личный вклад.** В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: разработка электродинамических моделей, исследование и оптимизация параметров поликонических антенн с линзами, металло-диэлектрических облучателей, однозеркальных и двухзеркальных антенных

систем, конечной синфазной антенной решетки щелевых рупоров, изготовление экспериментального образца поликонической антенны с градиентной диэлектрической линзой и проведение измерений ее параметров.

## 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** разработаны и исследованы всенаправленные в одной плоскости сверхдиапазонные (перекрывающие более одного диапазона волн) поликонические линзовые антенные системы.

В разделе 1.1 исследованы поликонические антенны с однородной диэлектрической линзой, состоящие из двух соосных металлических поликонусов 1 и торроидальной однородной диэлектрической линзы 2 с эллиптической образующей. Образующая поликонуса имеет вид ломаной линии. Антенна возбуждается 50-омной коаксиальной линией 3 диаметром 1.4 мм, проходящей через отверстие в нижнем поликонусе, центральный проводник которой соединен с верхним поликонусом (рис. 1а). Линза имеет одну преломляющую поверхность, образующая которой в цилиндрической системе координат определяется по известной формуле [1]

$$\left(\frac{r}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1, \quad (1)$$

где  $a = \frac{fn}{n+1}$  и  $b = \frac{f(n-1)}{n+1}$ ,  $f=D/2$ .

С использованием МКРВО проведено сравнение результатов численного моделирования поликонической антенны с однородной линзой диэлектрическими проницаемостями 1.5, 1.75, 2.08, 2.56 и 3.2. В результате, показано, что наилучшими характеристиками обладает поликоническая антенна с однородной линзой диэлектрической проницаемостью 1.75. Проведены исследования частотных характеристик коэффициентов отражения (КО) (рис. 1б) и усиления (КУ), эффективности (отношения КУ антенны к КУ линейного синфазного

источника с равномерным распределением амплитуды) пяти вариантов поликонической антенны с однородной линзой (рис. 2). На рисунках видно, что оптимизированная антенна с линзой диэлектрической проницаемостью 1.75 обеспечивает КО ниже уровня -10 дБ и эффективность более 0.8 в полосе 1.6-70 ГГц (44:1).

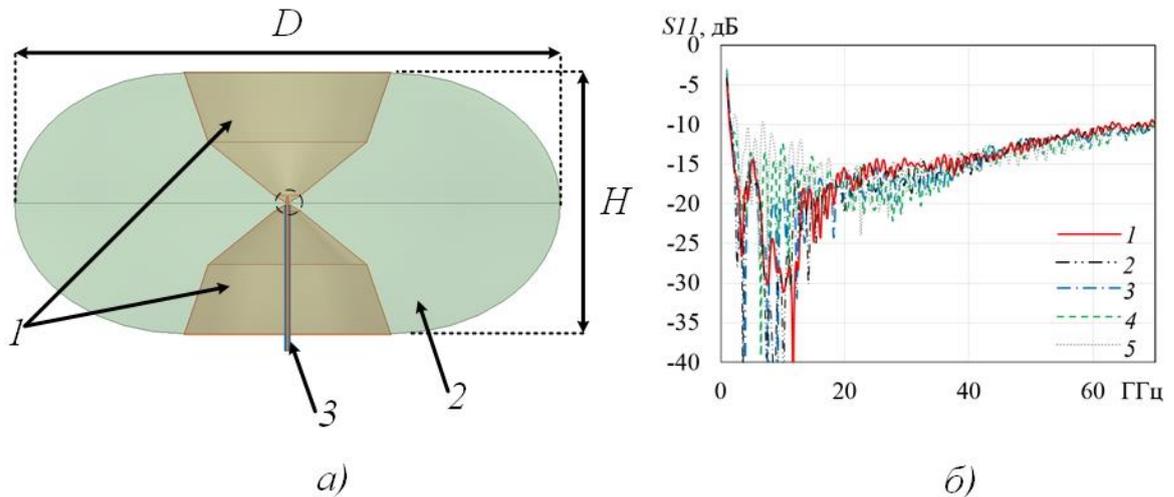


Рис. 1. Поликоническая антенна с однородной диэлектрической линзой (а), зависимость КО от частоты (б): диэлектрическая проницаемость линзы 1.5 (1), 1.75 (2), 2.08 (3), 2.56 (4) и 3.2 (5)

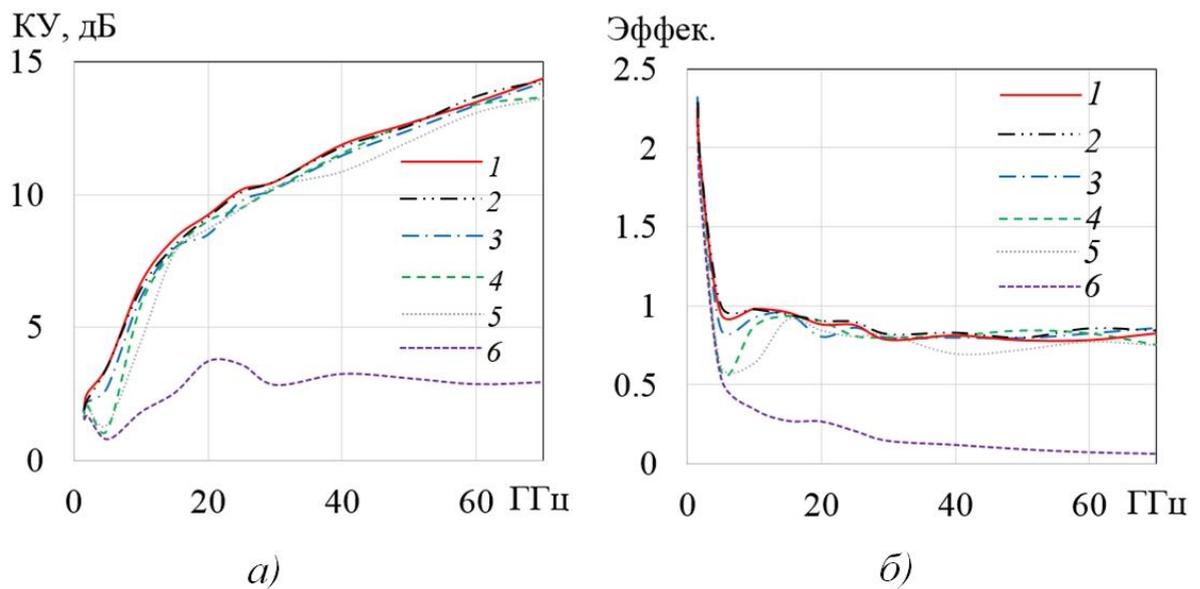


Рис. 2. Зависимости КУ (а) и эффективности (б) поликонической антенны с однородной диэлектрической линзой от частоты: диэлектрическая проницаемость линзы 1.5 (1), 1.75 (2), 2.08 (3), 2.56 (4), 3.2 (5) и без линзы (6)

В разделе 1.2 разработана и исследована поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой. Антенная система состоит из двух соосных металлических поликонусов 1 и торроидальной градиентной диэлектрической линзы 2. Поликоническая антенна возбуждается 50-омной коаксиальной линией 3 диаметром 1.4 мм (рис. 3а). Образующая поликонуса имеет вид ломаной линии, образующие градиентной линзы определяются крайними лучами.

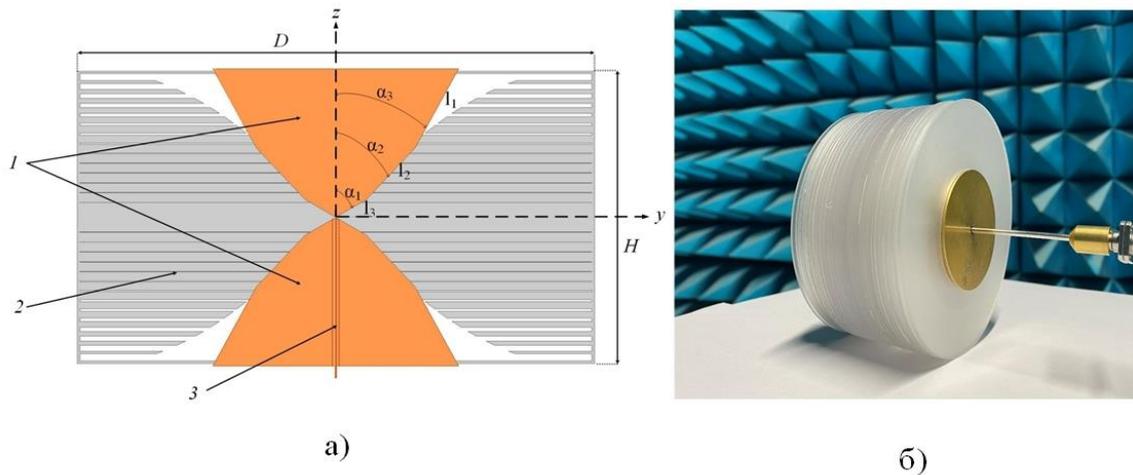


Рис. 3. Вертикальное сечение поликонической антенны с градиентной линзой (а) и ее экспериментальный образец (б)

Решение двумерной задачи синтеза анизотропной линзы Микаэляна получено в работе [2] и имеет вид

$$n_z = n_0 / ch \left( \pi \int_0^z m(t) dt / 2T \right), \quad (2)$$

где  $T = D/2$  – толщина линзы,  $m(z) = n_y / n_z$ , а  $n_z, n_y$  – компоненты тензора коэффициента преломления материала линзы.

Формулу (2) нельзя непосредственно использовать для расчетов компонентов тензора коэффициента преломления, поскольку в правую часть входит неизвестная функция  $m(z)$ . Преобразуем выражение (2) к виду [2]

$$z = \frac{2Tn_0}{\pi} \int_{n_z}^{n_0} \frac{dn}{n_y \sqrt{n_0^2 - n_z^2}}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) компоненты тензора коэффициента преломления

периодической слоистой среды в статическом приближении [3]

$$n_y = \sqrt{1-c+c\varepsilon}, \quad n_z = \sqrt{\varepsilon} / \sqrt{(1-c)\varepsilon+c}, \quad (4)$$

где  $c$  - коэффициент заполнения воздуха диэлектриком, равный отношению толщины диэлектрического слоя к периоду, а  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала слоев, находим функцию  $z(c)$

$$z = \frac{T}{\pi} \int_{n_z(c)}^{n_0} \frac{\sqrt{(\varepsilon-1)\varepsilon}}{[(1-t)\varepsilon+t] \sqrt{[(1-t)\varepsilon+t](1-t)}} dt. \quad (5)$$

Путем численного моделирования с использованием МКЭ проведены исследования частотных характеристик КО и КУ линзовой поликонической антенной системы.

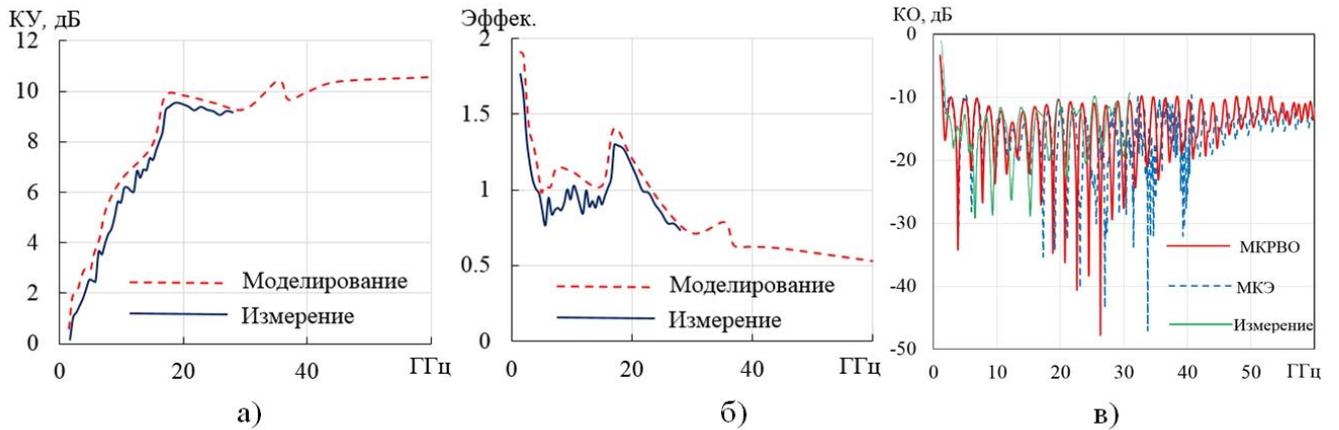


Рис. 4. Зависимости КУ (а), эффективности (б) и КО (в) поликонической антенны с градиентной диэлектрической линзой

Для проверки результатов численного моделирования разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец поликонической антенны с линзой в виде набора параллельных диэлектрических дисков из полистирола (рис. 3б), толщина которых меняется в соответствии с формулой (5). Рассчитанные и измеренные частотные зависимости КУ, эффективности и КО поликонической антенны с анизотропной градиентной линзой приведены на рис. 4а, 4б и 4с, соответственно. На рисунках видно, что разработанная и оптимизированная поликоническая антенна с линзой обеспечивает КО ниже уровня -10 дБ и эффективность более 0.5 в полосе частот 1.5-60 ГГц (40:1).

**Во второй главе** разработаны облучатели и проведены исследования однозеркальных антенных систем с этими облучателями.

В разделе 2.1 разработан однополяризационный облучатель (рис. 5а) на основе пирамидального рупора с диэлектрической пирамидальной вставкой и коаксиально-волноводным переходом (КВП).

Путем численного моделирования с использованием МКЭ и МКРВО проведено исследование частотных характеристик КО (рис. 5б), ширины главного лепестка ДН и положения фазового центра облучателя. На рис. 5б видно, что облучатель согласован по уровню -10 дБ в полосе 6.5-16.5 ГГц. Частотные характеристики КУ и КИП офсетной однозеркальной антенной системы (рис. 6а) с диаметром апертуры 300 мм с этим облучателем приведены на рис. 6б.

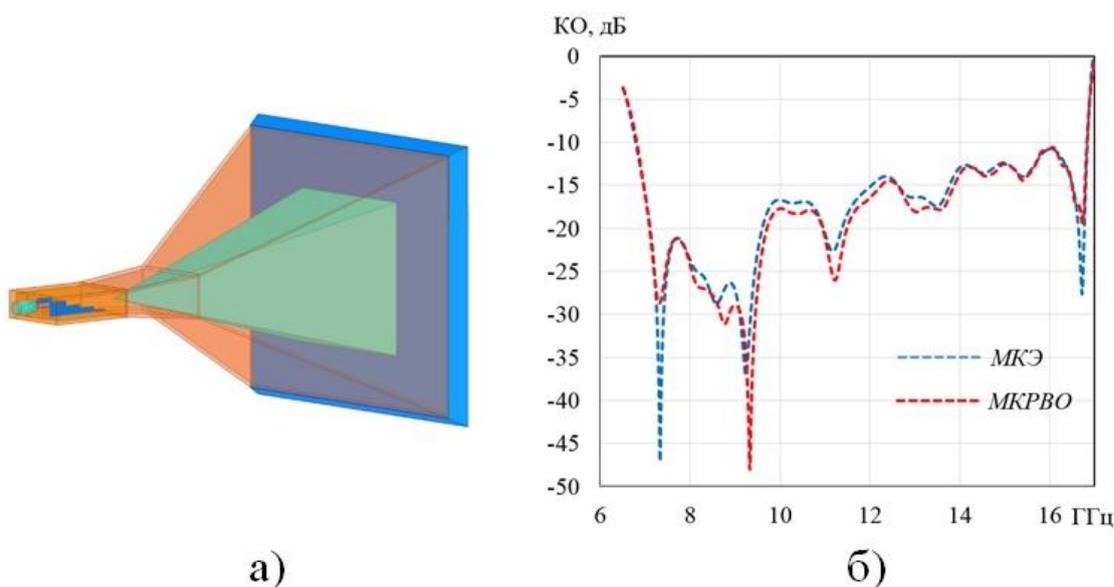


Рис. 5. Пирамидальный облучатель с диэлектрическими вставками (а) и его частотные зависимости КО (б)

На рис. 6б приведены частотные характеристики величины КИП зеркальной антенны диаметром 300 мм. На рисунке видно, что антенна обеспечивает величину КИП выше 0.5 в полосе 6.5-16.5 ГГц (2.5:1).

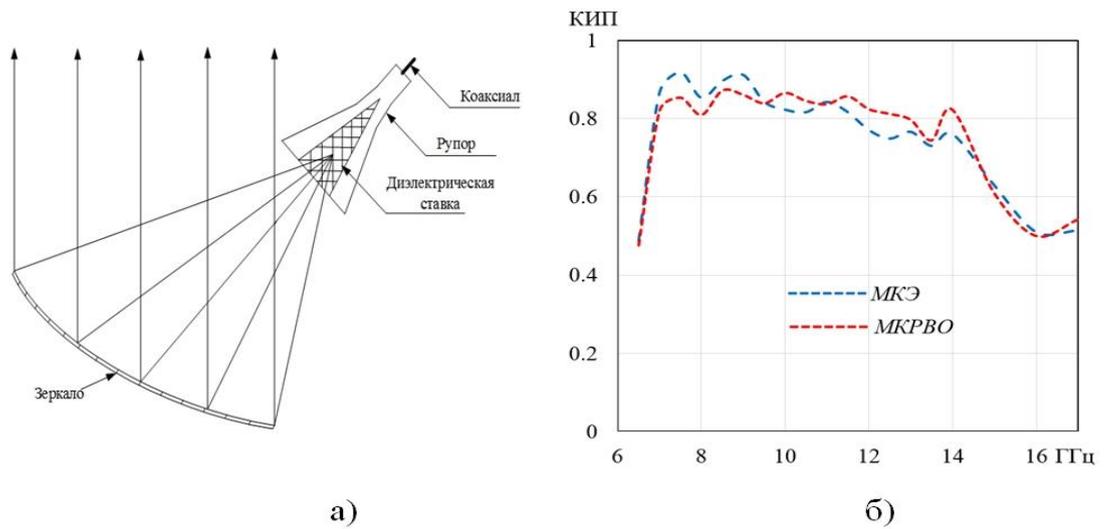


Рис. 6. Схема зеркальной антенной системы (а) и ее частотные характеристики КИП (б)

В разделе 2.2 исследован и разработан двухполяризационный облучатель на основе круглого четырехребренного рупора с двухслойной диэлектрической вставкой (рис. 7а) и исследованы частотные характеристики однозеркальной офсетной антенной системой с этим облучателем.

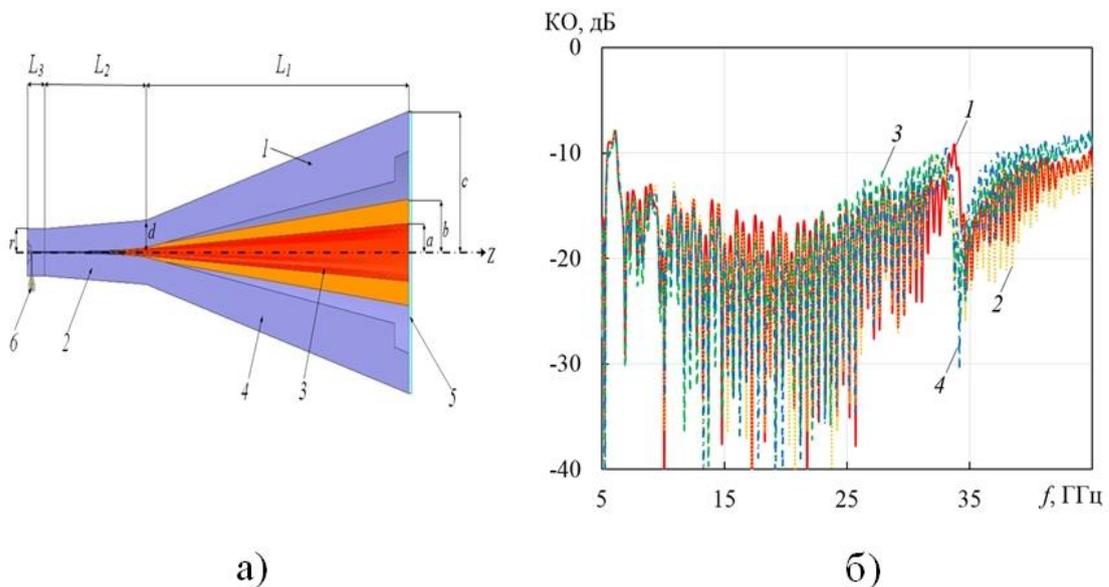


Рис. 7. Металлодиэлектрический рупорный облучатель (а), зависимости от частоты КО (б) со входов 1 (1, 2) и 2 (3, 4), МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

В качестве возбуждителя использован КВП в котором, в отличие от прототипа, к основанию волновода примыкают не треугольные, а прямоугольно-

треугольные вырезы, при этом отсутствуют проводники, соединяющие противоположные ребра рупора и нерегулярный диэлектрический конуса между ними, что существенно упрощает конструкцию КВП.

Путем численного моделирования с использованием МКЭ и МКРВО проведено исследование частотных характеристик КО (рис. 7б) и коэффициента поляризационной развязки входов, ширины главного лепестка ДН и положения фазового центра облучателя. Проведено исследование частотных характеристик КУ и КИП офсетной параболической однозеркальной антенны системы с диаметром апертуры 600 мм и разработанным облучателем. Частотные характеристики КУ и КИП, рассчитанные двумя методами, приведены на рис. 8. На рисунке видно, что в антенная система обеспечивает величину КИП выше 0.5 в полосе 6-30 ГГц (5:1).

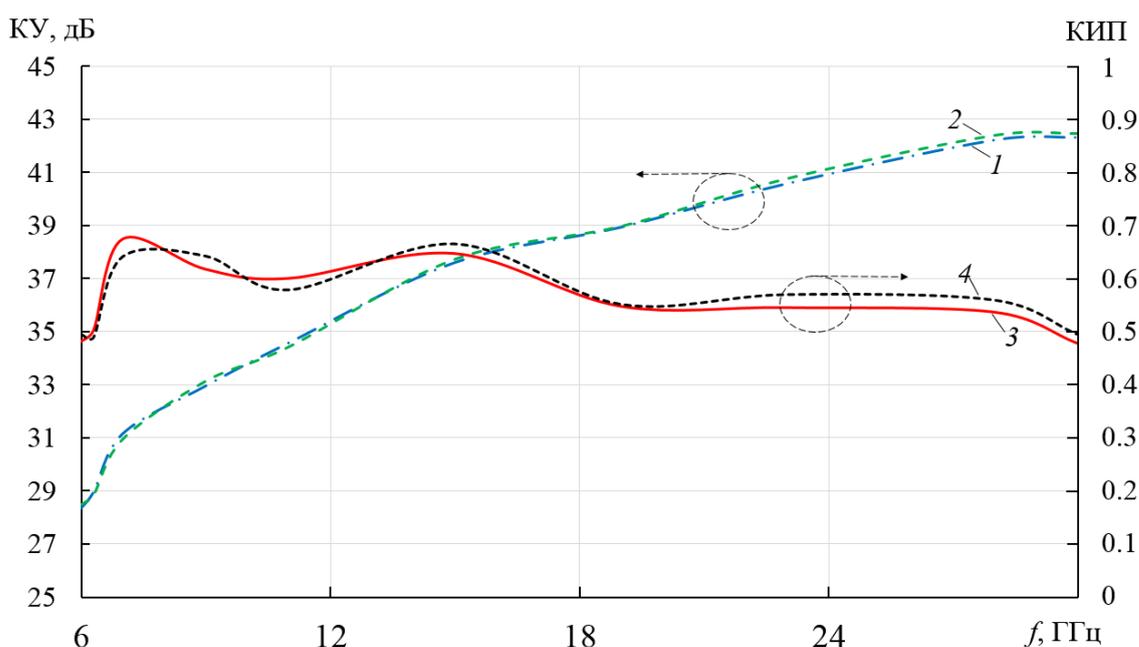


Рис. 8. Зависимость от частоты коэффициента усиления (1, 2) и величины КИП (3, 4) зеркальной антенны, рассчитанная с использованием МКЭ (1, 3), МКРВО (2, 4)

**В третьей главе** разработаны и исследованы осесимметричная и офсетная двухзеркальные антенные системы.

В разделе 3.1 разработана и исследована осесимметричная двухзеркальная антенна с облучающей системой на основе градиентной линзы Микаэляна с

возбудителем в виде открытого конца круглого металло-диэлектрического волновода (рис. 9а). Вспомогательное зеркало интегрировано с поверхностью линзы. Геометрия луча в антенной системе показана на рис. 9б.

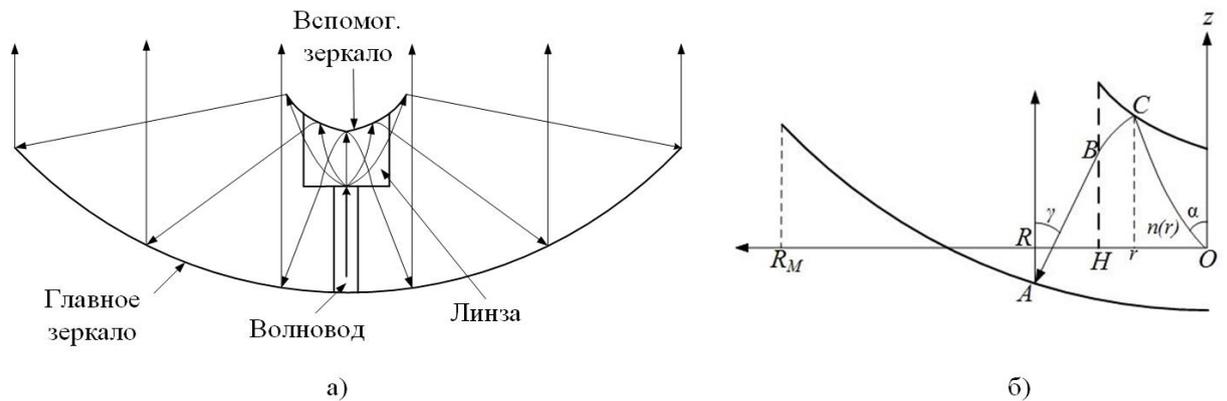


Рис. 9. Сечение осесимметричной двухзеркальной антенной системы (а), геометрия луча (б)

Для любой точки  $r$  из уравнения энергетического баланса

$$\int_0^r D^2(r)n^2(r)rdr = Q_0 \int_H^R Q^2(R)RdR, \quad (6)$$

где  $D(r)$  распределение поля на выходной поверхности линзы, а  $Q(R)$  – требуемое распределение поля в апертуре главного зеркала,  $H$  – радиус вспомогательного зеркала,  $R_M$  – радиус главного зеркала,  $n(r)$  – зависимость диэлектрической проницаемости в линзе Микаэляна от радиуса слоя, можно найти закон отображения  $R = M(r)$  и обратный закон  $r = M^{-1}(R)$ .

Уравнение луча внутри линзы, проходящего через точку  $C$  имеет вид

$$z(r) = \int_0^r \frac{adr}{\sqrt{n^2(r) - a^2}}, \quad (7)$$

где  $a = n(r_c)$ .

Уравнение луча внутри линзы, проходящего через точку  $B$  (рис. 9б) имеет вид:

$$z_2(r) = z_B + \int_r^H \frac{a_2 dr}{\sqrt{n^2(r) - a_2^2}}, \quad (8)$$

где  $a_2 = n(H) \cos \gamma$ ,  $\gamma$  - угол выхода луча из линзы (рис. 9б).

Найдем точку пересечения кривых  $C(r_c, z_c)$  кривых  $z(r)$  и  $z_2(r)$ , т.е. корень уравнения

$$z(r) - z_2(r) = 0. \quad (9)$$

Эйконал луча, падающего на главное зеркало определяется формулой  $L(\gamma) = -Z + |AB| + BC + OC$ , (10)

где  $OC = \int_0^{r_c} \sqrt{n^2(r) - a^2} dr + az_c$ ,  $BC = \int_{r_c}^H \sqrt{n^2(r) - a_2^2} dr + a_2(z_c - z_B)$ .

Потребуем, чтобы эйконал любого луча был равен эйконалу центрального луча, т.е.  $L(\gamma) = L_0$ . Из уравнения (10) можно найти величину угла  $\gamma$ , которая зависит от координат  $(R, Z)$  точки А на главном зеркале. Из условия равенства углов падения и отражения на главном зеркале следует

$$\frac{dZ}{dR} = \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}. \quad (11)$$

В результате решения этого дифференциального уравнения находим образующую главного зеркала, после чего образующая вспомогательного зеркала, т.е. координаты  $(r_c, z_c)$ , определяются из уравнения (9).

Путем электродинамического моделирования с использованием МКЭ и МКРВО исследованы частотные зависимости распределения амплитуды и фазы поля на выходе линзы облучающей системы и КО. В разделе развита методика синтеза образующих зеркал с заданным распределением поля в апертуре главного зеркала с целью обеспечения максимизации величины КУ и КИП. Путем электродинамического моделирования с использованием ММ и МКРВО были исследованы частотные зависимости КУ, КИП, ширины главного лепестка ДН и уровня боковых лепестков (УБЛ) двухзеркальной антенной системы диаметром 1 м. Исследованные результаты показали, что при малом отношении диаметра главного зеркала к вспомогательному осесимметричная двухзеркальная антенна обладает высоким УБЛ. На рис. 10 показаны частотные зависимости КИП осесимметричной двухзеркальной антенной системы с металлодиэлектрической облучающей системой и ее диаграммы направленности в  $H$ - (1, 3) и  $E$ - (2, 4) плоскости на частоте 22 (1, 2) и 30 ГГц (3, 4).

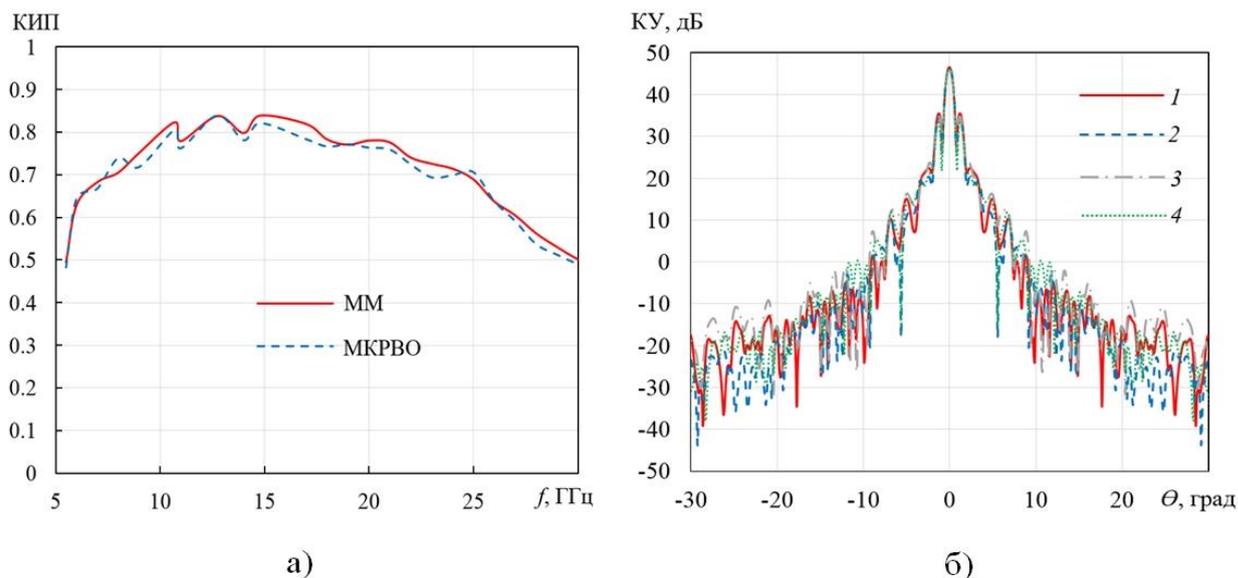


Рис. 10. Частотные зависимости КИП (а) и диаграммы направленности двухзеркальной антенной системы (б)

В разделе 3.2 разработана офсетная двухзеркальная антенная система (рис. 11а) с рупорно-линзовым облучателем. Для этого решена задача синтеза образующих входной и выходной поверхности диэлектрической линзы, обеспечивающих плоский выходной фронт с трапецевидальным распределением амплитуды поля с целью обеспечения максимизации КУ и КИП.

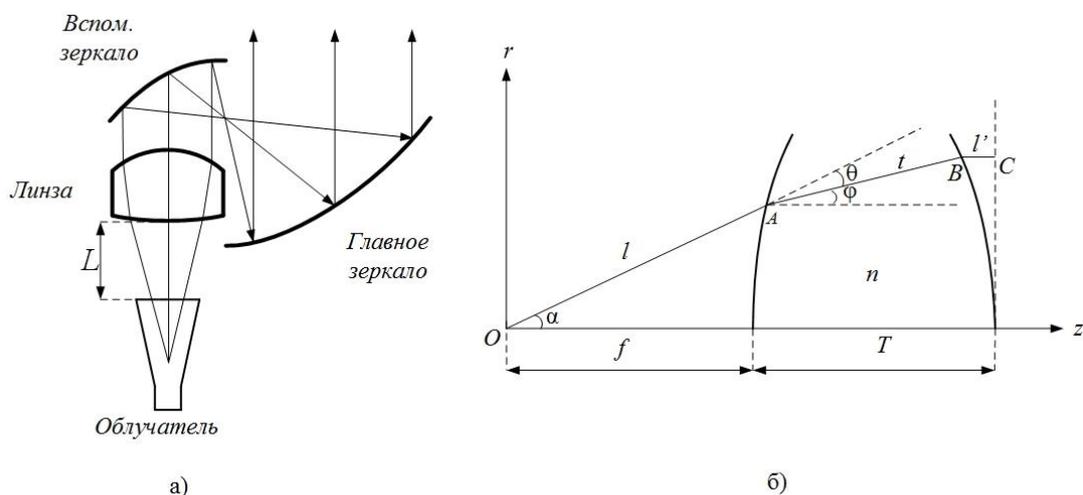


Рис. 11. Офсетная двухзеркальная антенная система (а), геометрия луча в рупорно-линзовой облучающей системе (б)

Дифференциальное уравнение для функции  $l(\alpha)$ , определяющей первую преломляющую поверхность линзы (рис. 11б) имеет вид

$$\frac{dl(\alpha)}{d\alpha} = l(\alpha) \frac{\sin \theta}{\cos \theta - 1/n}, \quad (12)$$

где

$$\theta = \alpha + \arccos \frac{S(\alpha)}{\sqrt{K(\alpha)^2 + S(\alpha)^2}} - \arcsin \frac{nK(\alpha)}{\sqrt{K(\alpha)^2 + S(\alpha)^2}},$$

$$S(\alpha) = l(\alpha)(\cos \alpha - 1) + T(n-1), \quad K(\alpha) = r(\alpha) - l(\alpha) \sin \alpha.$$

Решая дифференциальное уравнение (12) численным методом, находим образующую первой преломляющей поверхности, после чего определяем образующую второй преломляющей поверхности в параметрической форме [4]

$$r(\alpha) = l(\alpha) \sin \alpha + \frac{l(\alpha)(\cos \alpha - 1) + T(n-1)}{n - \cos(\alpha - \theta)} \sin(\alpha - \theta), \quad (13)$$

$$z(\alpha) = \frac{l(\alpha)(n \cos \alpha - \cos(\alpha - \theta)) + T(n-1) \cos(\alpha - \theta)}{n - \cos(\alpha - \theta)}. \quad (14)$$

С использованием МКЭ проведено исследование частотных зависимостей амплитудного и фазового распределения поля на выходе диэлектрической линзы для двух случаев: линза расположена на расстоянии от металло-диэлектрического рупора (рис. 7) и линза расположена в апертуре металлического рупора. Далее с использованием ММ исследованы зависимости от частоты величин КУ, КИП и УБЛ офсетной двухзеркальной антенны диаметром 300 мм.

На рис. 12 показаны частотные зависимости КИП (а) и УБЛ (б) офсетной двухзеркальной антенной системы с металло-диэлектрическим рупором металлическим рупором.

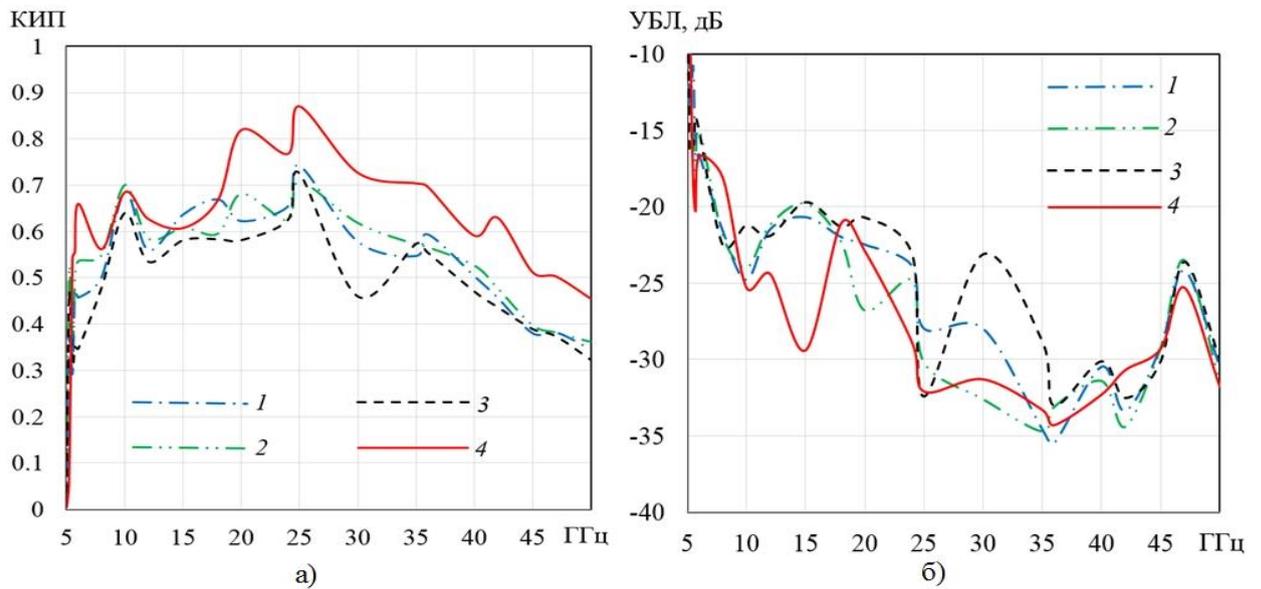


Рис. 12. Частотные зависимости КИП (а), УБЛ (б) двухзеркальной антенной системы: с металло-диэлектрическим рупором и диэлектрической проницаемостью линзы 2.25 (1), 2.56 (2), 3.2 (3) и с металлическим рупором и линзой диэлектрической проницаемостью 2.56 в апертуре (4)

**В четвертой главе** разработаны и исследованы синфазные антенные решетки щелевых рупоров.

В разделе 4.1 рассмотрены бесконечные (с использованием канала Флоке) и конечные решетки с двумя типами экрана (рис. 13) с излучающими элементами на основе щелевых рупоров и изменением импеданса по закону Клопфенштейна,

$$\ln[Z(z)] = 0,5 \ln(Z_1 Z_2) + \frac{Z_2 - Z_1}{(Z_2 + Z_1) \operatorname{ch}(A)} \left[ A \int_0^z \frac{I_1(A\sqrt{1-t^2})}{\sqrt{1-t^2}} dt + U(z) + U(z-L) \right], \quad (15)$$

который обеспечиваем наибольшую ширину полосы согласования по заданному уровню КО, где  $Z_1$ ,  $Z_2$  - импеданс на входе и выходе элемента бесконечной решетки,  $L$  - длина элемента,  $I_1$  - модифицированная функция Бесселя 1-ого порядка,  $U(x)$  - функция Хевисайда, а параметр  $A$  выбирается из условия максимально допустимого коэффициента отражения в полосе частот. В случае задания этого уровня -10 дБ  $A=1.59$ .

На рис. 14 приведены рассчитанные с использованием МКЭ частотные зависимости КО решеток.

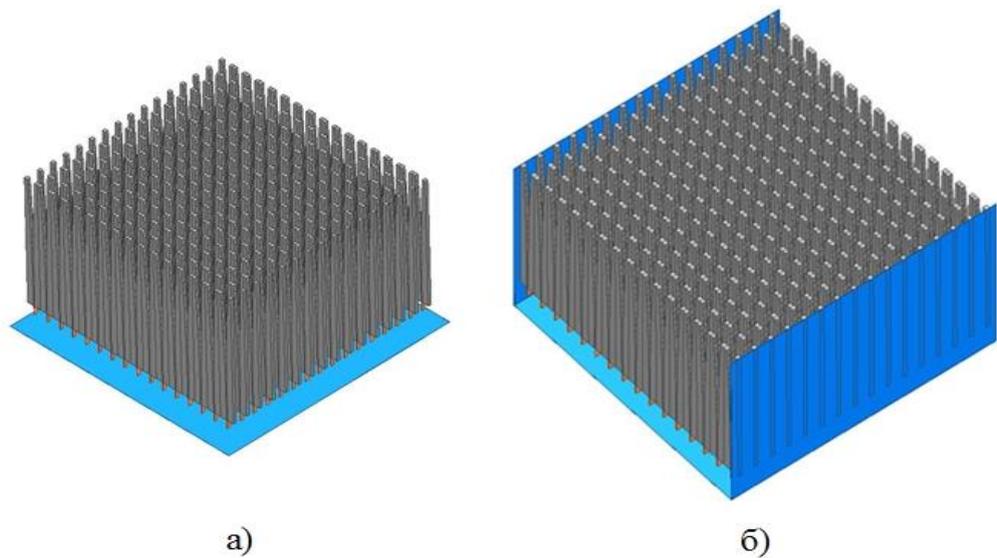


Рис. 13. 256-элементная синфазная антенная решетка с плоским экраном (а) и с П-образным экраном (б)

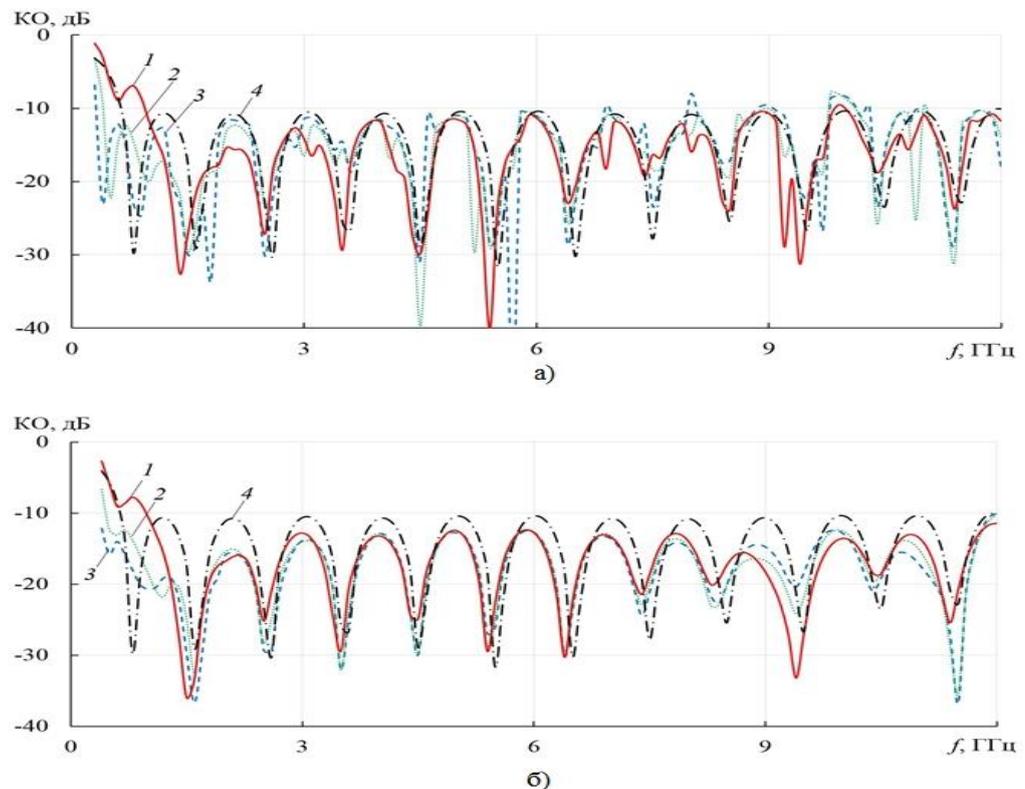


Рис. 14. Зависимость КО от частоты 64 (1), 144 (2), 256 (3) -элементных решеток и бесконечной решетки (4) с периодом 15x15 мм с плоским (а) и экраном с П-образным экраном (б)

В разделе 4.2 рассмотрена система питания, состоящая из коаксиального и полоскового делителей мощности (рис. 15), которые исследованы и оптимизированы с использованием МКЭ. В результате система питания

обеспечивает равномерное распределение мощности и фазы поля на выходах и КО ниже -10 дБ в полосе частот 0.5-10.5 ГГц.

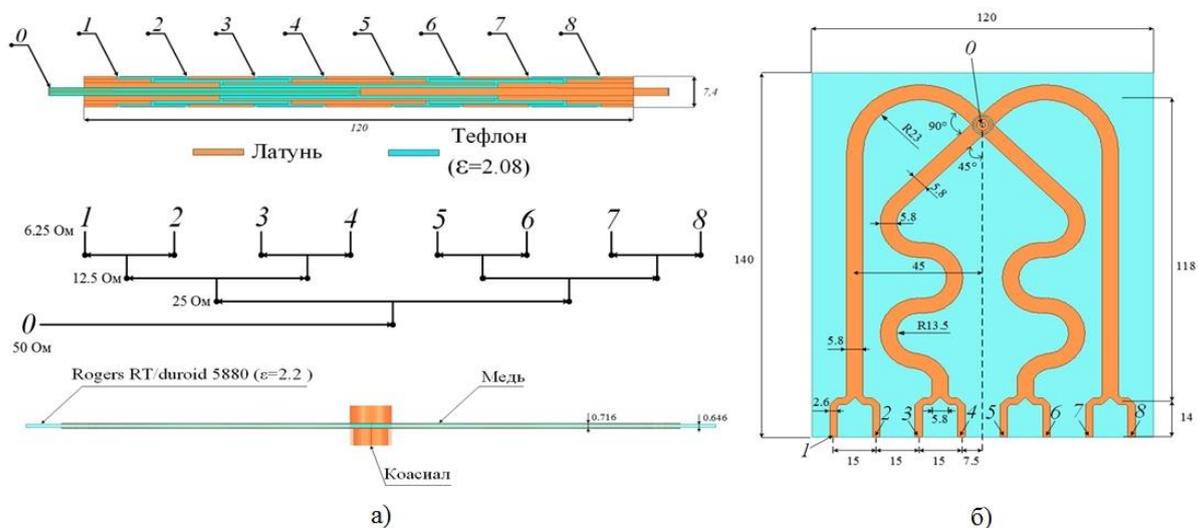


Рис. 15. Коаксиальный (а) и полосковой (б) делитель мощности

В разделе 4.3 исследована синфазная антенная решетка щелевых рупоров с плоским и П-образным экраном с оптимизированным в разделе 4.1 излучающим элементом и в разделе 4.2 - системой питания.

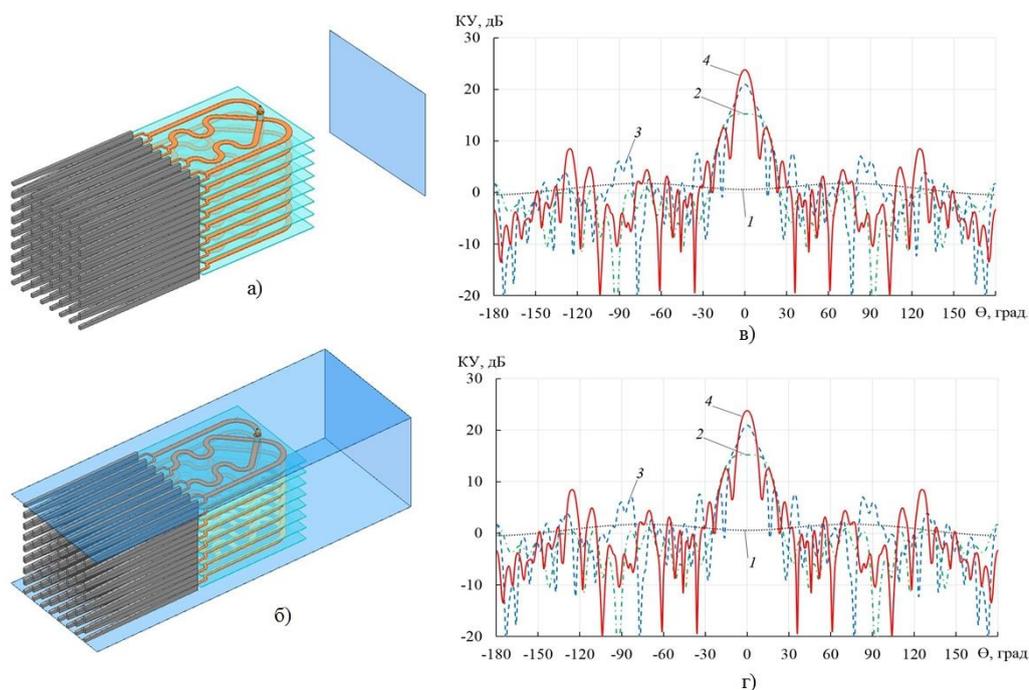


Рис. 16. Антенная решетка с делителем мощности и плоским (а), П-образным экраном (б); ДН решетки с плоским (в) и П-образным (г) экраном (Н-плоскость)

Путем электродинамического моделирования с использованием МКЭ были исследованы частотные зависимости КУ, КУ, КИП и отношения излучения вперед-назад антенной решетки с двумя типами экрана (рис. 17).

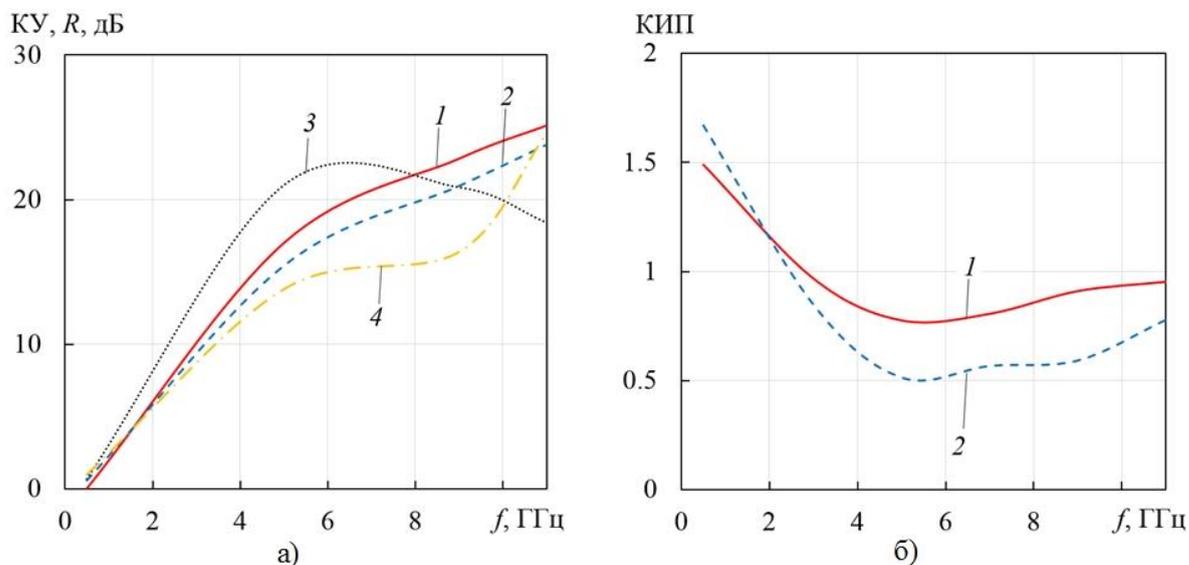


Рис. 17. Частотные зависимости: а) КУ (1, 2) и отношения излучения вперед-назад (3, 4), П-образный экран (1, 3), плоский экран (2, 4); б) КИП антенной решетки с П-образным (1) и плоским (2) экраном

Видно, что антенная решетка с П-образным экраном обладает более высокими значениями КУ, КИП и отношения излучения вперед-назад.

**В Заключение** проведены основные результаты диссертации:

1. Разработана, оптимизирована и с использованием численного моделирования исследована поликоническая антенна с однородной диэлектрической линзой. В полосе частот 44:1 антенна обеспечивает КУ ниже -10 дБ и эффективность излучения не менее 0.8.

2. Разработана, оптимизирована и с использованием численного моделирования исследована поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой Микаэляна. В полосе частот 40:1 антенна обеспечивает КУ ниже -10 дБ и обеспечивает эффективность излучения не менее 0.5. Изготовлен макет антенны и проведено его экспериментальное исследование, которое подтвердило результаты моделирования.

3. Разработана и с использованием численного моделирования исследована однополяризационная офсетная однозеркальная антенная система с облучателем простой конструкции в виде пирамидального рупора с диэлектрической вставкой. Антенна обеспечивает КИП более 0.6 в полосе частот более 2:1.

4. Разработана и с использованием численного моделирования исследована двухполяризационная офсетная однозеркальная антенная система с облучателем в виде четырехреберного круглого рупора с диэлектрической вставкой. Антенна обеспечивает КИП более 0.5 в полосе частот 5:1.

5. Разработана и с использованием численного моделирования исследована двухполяризационная осесимметричная двухзеркальная антенная система с облучателем на основе линзы Микаэляна и величиной КИП более 0.5 в полосе частот 5:1.

6. Разработана и с использованием численного моделирования исследована двухполяризационная офсетная двухзеркальная антенная система с рупорно-линзовым облучателем и величиной КИП более 0.5 в полосе частот 9:1.

7. Разработана и исследована синфазная антенная решетка с системой питания и величиной КИП более 0.8 в полосе частот более 20:1.

Основные результаты опубликованы в указанных ниже работах.

### **Список публикаций**

1. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Сверхдиапазонная высоконаправленная поликоническая антенна с диэлектрической линзой. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2025. № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2>.

2. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Сверхдиапазонная поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70. №1. С.12-18.

3. Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхдиапазонная поликоническая антенная с градиентной диэлектрической линзой. Труды X Международной конференции “Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2023”. г. Москва. 22-23 ноября 2023. С. 202-209.

4. Калошин В.А., Тхань Нгуен Тхе. Сверхширокополосный

металлодиэлектрический облучатель на основе пирамидального рупора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.3>

5. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Двухполяризационный сверхширокополосный металлодиэлектрический облучатель. Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69. № 10. с. 954–959.

6. Венецкий А.С., Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхширокополосная двухзеркальная антенна с металлодиэлектрической облучающей системой // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2025. – № 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.16>

7. Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхширокополосная офсетная двухзеркальная антенна с рупорно-линзовой облучающей системой // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2025. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.1>

8. Дупленкова М.Д., Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхдиапазонная синфазная антенная решетка. Труды XI Международной конференции “Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2024”. г. Москва. 20-21 ноября 2024. С. 55-61.

9. Дупленкова М.Д., Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Исследование плоской синфазной двумерно-периодической сверхдиапазонной антенной решетки щелевых рупоров // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70. № 2. С.17-29.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Сов. Радио. 1974.
2. Калошин В. А. Планарная анизотропная линза Микаэляна на основе EBG-структуры // ДАН. 2016. Т. 470. № 2. С.253.
3. Рытов С. М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды. ЖЭТФ. 1955. Т.2. № 3. С.605.
4. Head A.K. Aplanatic Lenses // Proc. Phys. Soc. 1959. V. L24. № 6. P. 731.