

На правах рукописи



ВИ УТ НАМ

МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ БИФОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Специальность 2.2.14—«Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук

Калошин Вадим Анатольевич

Москва–2022

Работа выполнена на кафедре радиотехники и системы управления физтех-школы радиотехники и компьютерных технологий 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 **Коган Борис Лазаревич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры Радиотехнических приборов и антенных систем ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ»

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

Ведущая организация **ПАО «Радиофизика»**

Защита состоится 8 июля 2022 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 (Д002.231.02) 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/ViUtNam/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Кузьмин
Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

В последнее время возрос интерес к многолучевым антеннам. Этот интерес обусловлен тем, что наряду с традиционными приложениями таких антенн, появляются новые, в частности, в базовых станциях систем мобильной связи нового поколения, наземных и бортовых системах космической связи, радио-мониторинга и т. д. Еще одна причина интереса – появление и развитие новых технологий изготовления СВЧ элементов и антенн, в частности, аддитивных и планарных технологий. При этом возрастающие требования в приложениях и внутренняя логика развития науки требуют улучшения параметров этого класса антенн, в первую очередь, расширения сектора обзора многолучевой антенны и повышения коэффициента усиления.

Для формирования многолучевой диаграммы направленности в планарных антенных решетках с квазиоптическим формированием лучей используются диаграмно-образующие системы (ДОС) на основе планарного волновода с расположенными в волноводе с облучателями и фокусирующей системы. В простейшем случае конструкция антенной решетки содержит два слоя, связанных параболической щелью или системой отверстий, которые замыкаются параболическим зеркалом. Однако система с параболическим зеркалом не может обеспечить широкоугольную многолучевую диаграмму из-за аббераций, возникающих при смещении облучателя из фокуса параболы. Для уменьшения величины среднеквадратической абберации (СКА) применяют бифокальные двухзеркальные и линзовые фокусирующие системы. В работах Б.Е. Кинбера с соавторами предложена методика последовательного синтеза участков поверхности таких систем. Для трехмерных двухзеркальных систем (с фокусировкой в двух плоскостях) методика была развита в работах Б.Л.Когана и А.Н.Пластикова. Далее с целью обеспечения непрерывности вторых производных методика была развита и реализована в задачах синтеза цилиндрических бифокальных линзовых и двухзеркальных систем в работах В.А.Калошина с соавторами.

Однако, потенциальные возможности двухзеркальных, линзовых и зеркально-линзовых бифокальных систем с точки зрения минимизации СКА и построения широкоугольных многолучевых антенн на их основе не были исследованы в достаточной степени.

Из изложенного выше следует, что задача синтеза двухзеркальных, линзовых и зеркально-линзовых бифокальных систем с минимальной СКА с целью построения на их основе широкоугольных многолучевых антенн является актуальной как с научной, так и прикладной точек зрения.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и исследование широкоугольных многолучевых антенн на основе бифокальных систем с минимальными aberrациями.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- 1) Разработка методики и алгоритмов синтеза цилиндрических бифокальных систем с минимальными aberrациями, а также их программная реализация.
- 2) Синтез двухзеркальной цилиндрической бифокальной системы с минимальными aberrациями.
- 3) Синтез зеркально-линзовой цилиндрической бифокальной системы с минимальными aberrациями.
- 4) Синтез цилиндрической бифокальной линзы с минимальными aberrациями.
- 5) Синтез трехмерной бифокальной линзы.
- 6) Разработка электродинамических моделей и исследование многолучевых антенн на базе двухзеркальной, зеркально-линзовой и линзовой бифокальных систем.
- 7) Изготовление экспериментального образца и проведение измерений параметров многолучевой антенны на основе бифокальной цилиндрической диэлектрической линзы.

Методы исследования

В работе использованы: аналитическая теория синтеза на основе геометрической оптики, приближение Кирхгофа и численный эксперимент на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Новые научные результаты

1. Развита численно-аналитическая методика синтеза бифокальных цилиндрических двухзеркальных, а также диэлектрических линзовых и зеркально-линзовых систем с минимальной величиной СКА.

2. Синтезированы двухзеркальные цилиндрические бифокальные системы с СКА: 8×10^{-6} в угле зрения 50° , 2×10^{-5} в угле зрения 70° и 4×10^{-5} в угле зрения 105° .

3. Синтезированы зеркально-линзовые цилиндрические бифокальные системы с СКА: 2×10^{-5} в угле зрения 50° , 5×10^{-5} в угле зрения 70° и 1.3×10^{-4} в угле зрения 100° .

4. Синтезирована цилиндрическая бифокальная диэлектрическая линза с СКА: 5×10^{-4} в угле зрения 90° .

5. Синтезирована трехмерная бифокальная диэлектрическая линза с СКА: 6×10^{-4} в угле зрения 90° .

6. С использованием численного моделирования исследованы широкоугольные многолучевые антенны на основе оптимизированных бифокальных систем.

Практическая значимость работы

1) Многолучевые антенны на основе синтезированных бифокальных систем позволяют расширить сектор обзора при заданном коэффициенте усиления и увеличить коэффициент усиления при заданном секторе обзора.

2) Разработана конструкция экспериментального макета многолучевой антенны на основе бифокальной цилиндрической диэлектрической линзы для угла зрения 90° .

Основные положения, выносимые на защиту

1) Развита методика решения задачи геометрического синтеза цилиндрических двухзеркальных бифокальных систем позволяет расширить угол обзора многолучевых антенн на их основе.

2) Развита методика решения задачи геометрического синтеза цилиндрических зеркально-линзовых бифокальных систем позволяет расширить угол обзора многолучевых антенн на их основе.

3) Развита методика решения задачи геометрического синтеза цилиндрических линзовых бифокальных систем позволяет расширить угол обзора многолучевых антенн на их основе.

4) Развита методика позволяет решать задачи геометрического синтеза трехмерных линзовых бифокальных систем.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на международной конференции: *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них 2 – в журналах,

индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 1 - в трудах Международных конференций, из них 1 - входящая в базу данных Scopus. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 106 страниц.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, Списка литературы из 28 наименований и двух Приложений. Диссертационная работа изложена на 109 страницах, содержит 70 рисунков.

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит: вывод и решение уравнений геометрикооптического синтеза двухзеркальных, линзовых и зеркально-линзовых бифокальных систем, оптимизация их параметров с целью реализации минимальной СКА в заданном угле зрения, исследования многолучевых антенн на основе синтезированных бифокальных систем с использованием численного моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) и приближения Кирхгофа, а также изготовление макета многолучевой линзовой антенны и проведение измерений.

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, вносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены задачи синтеза и оптимизации цилиндрических двухзеркальных бифокальных систем.

В разделе 1.1. описана методика синтеза, при этом функция, описывающая начальный участок вспомогательного зеркала, задана в виде полинома 2-го порядка или 4-го порядка, а форма начального участка главного зеркала находится из условия формирования плоского фронта при нахождении источника цилиндрической волны на оси системы (в точке F , рис.1).

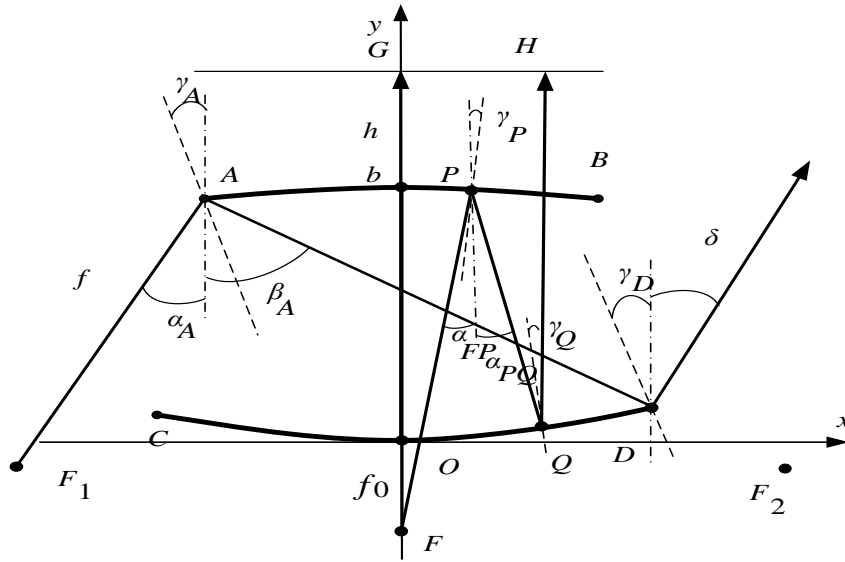


Рис. 1. Начальные участки зеркал

Для определения новых участков зеркал используется алгоритм последовательного синтеза из условия формирования плоского фронта при нахождении источник в фокусах F_1 и F_2 . В результате синтеза новых участков находятся функции, описывающие форму зеркал, их первая и вторая производная. Непрерывность первых производных на стыках участков обеспечивается выбором углового положения фокусов. Приравнявая значения второй производной зеркал в точке первого стыка получено трансцендентное уравнение (1) относительно коэффициентов полинома, описывающего начальный участок вспомогательного зеркала, которое обеспечивает непрерывность вторых производных во всех точках стыка:

$$\frac{(y_0'^2 + 2T_0 y_0' - 1)x_N' - ((1 - y_0'^2)T_0 - 2y_0')y_N'}{f(y_0'^2 + 1)\sqrt{T_0^2 + 1}} + \alpha_0' + \frac{2y_0''x_N'}{1 + y_0'^2} = 0, \quad (1)$$

$$\text{где: } T_0 = \frac{S_b(f_0 + 2b + y_0 - \sqrt{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2}) + 2x_0(1 + C_b)}{(1 + C_b)C_b l_x};$$

$$S_b = \frac{(y_0'(y_0 + f_0) + x_0)}{(1 + y_0')\sqrt{(y_0 + f_0)^2 + x_0^2}}; \quad C_b = \frac{((y_0 + f_0) + y_0'x_0)}{(1 + y_0')\sqrt{(y_0 + f_0)^2 + x_0^2}};$$

$$\beta_0 = \arctg\left(\frac{x_0}{y_0 + f}\right) - \arctg(y_0'); \quad \beta_0' = \frac{y_0 + f_0 - x_0 y_0'}{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2} - \frac{2y_0''}{1 + y_0'^2};$$

$$l'_x = \frac{(-y'_0 + \frac{x_0 + (y_0 + f_0)y'_0}{\sqrt{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2}})(1 + C_b) + S_b \beta'_0 (\sqrt{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2} - f_0 - 2b_1 - y_0)}{(1 + C_b^2)} ;;$$

$$l_x = \frac{f_0 + 2b_1 + 2b_2 + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{1 + C_b}; \alpha'_0 = \frac{2\beta'_0}{(1 + l_x C_b \beta'_0 + l'_x S_b)}; S_T = \frac{T_0(1 - y_0'^2) + 2y'_0}{(1 + y_0'^2)\sqrt{1 + T_0^2}};$$

$$C_T = \frac{1 - y_0'^2 - 2T_0 y_0'^2}{(1 + y_0'^2)\sqrt{1 + T_0^2}}; A = \sqrt{(x_0 + l_x S_b)^2 + l_x^2 C_b^2} + f; A_1 = \frac{S_b - T_0(1 + C_b)}{(1 + C_b)\sqrt{1 + T_0^2}};$$

$$B = A^2 + (l_x C_b - f C_T)^2 - (l_x S_b - f S_T)^2; B_1 = 2AA_1 + \frac{2(l_x C_b - f C_T)^2 S_b}{1 + C_b} - (l_x S_b - f S_T);$$

$$C_1 = 2A_1 + \frac{2\alpha'_0 (l_x C_b - f C_T - (l_x S_b - f S_T) T_0)}{\sqrt{1 + T_0^2}} - \frac{2S_b}{(1 + C_b)\sqrt{1 + T_0^2}}$$

$$C = 2A + \frac{2(l_x C_b - f C_T) T_0 + 2(l_x S_b - f S_T)}{\sqrt{1 + T_0^2}}; l_0 = \frac{B}{C}; l'_0 = \frac{B_1 C - B C_1}{C^2};$$

$$x'_N = 1 + \frac{l'_0 T_0}{\sqrt{1 + T_0^2}} + \frac{l_0 \alpha'_0}{\sqrt{1 + T_0^2}}; y'_N = \frac{S_b}{1 + C_b} + \frac{l'_0}{\sqrt{1 + T_0^2}} + \frac{l_0 \alpha'_0 T_0}{\sqrt{1 + T_0^2}},$$

остальные обозначения понятны из рис.1. Уравнение (1) решается с использованием численной процедуры.

В разделе 1.2 проводится оптимизация параметров с целью минимизации величины СКА при фиксированном расстоянии b между зеркалами и угле зрения бифокальной системы (определяется отношением полуразмера начального отрезка x_0 к b). Параметрами оптимизации являются расстояние от конца начального отрезка до фокуса F_1 , расстояние p от вспомогательного зеркала до точки F_0 ($p=f_0+b$). На плоскости этих параметров для углов зрения 50° , 70° и 105° найдены границы области существования решения задачи синтеза и приведены зависимости величины СКА для систем с начальным участком вспомогательного зеркала в виде параболы (рис. 3). На рис.2 видно, что ее минимум достигается на границе области существования решения. На рис.3 показаны зависимости СКА от угла зрения двухзеркальных бифокальных систем с оптимальными параметрами f и p . Использование в качестве начального участка вспомогательного зеркала полинома четвертого порядка не привело к дополнительному уменьшению СКА.

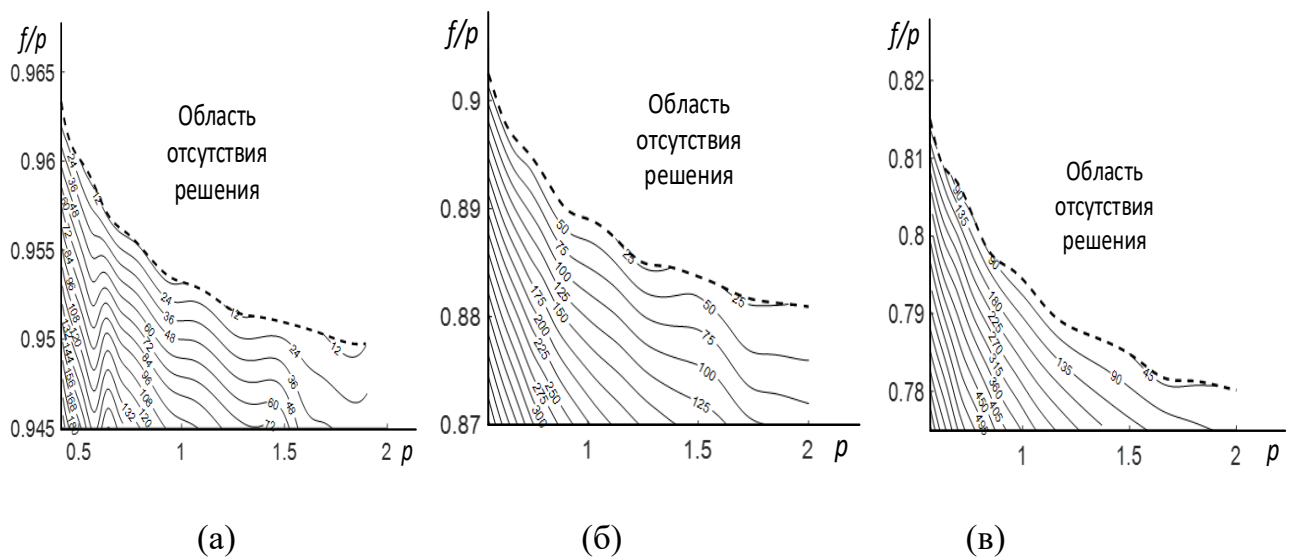


Рис. 2. Линии уровня величины $10^6\sigma$ бифокальной зеркальной системы в зависимости от параметров p и f/p при $b=0.1$ и разных углах зрения: а) угол зрения 50° ($x_0 = 0.0175$), б) угол зрения 70° ($x_0 = 0.028$), в) угол зрения 105° ($x_0 = 0.042$).

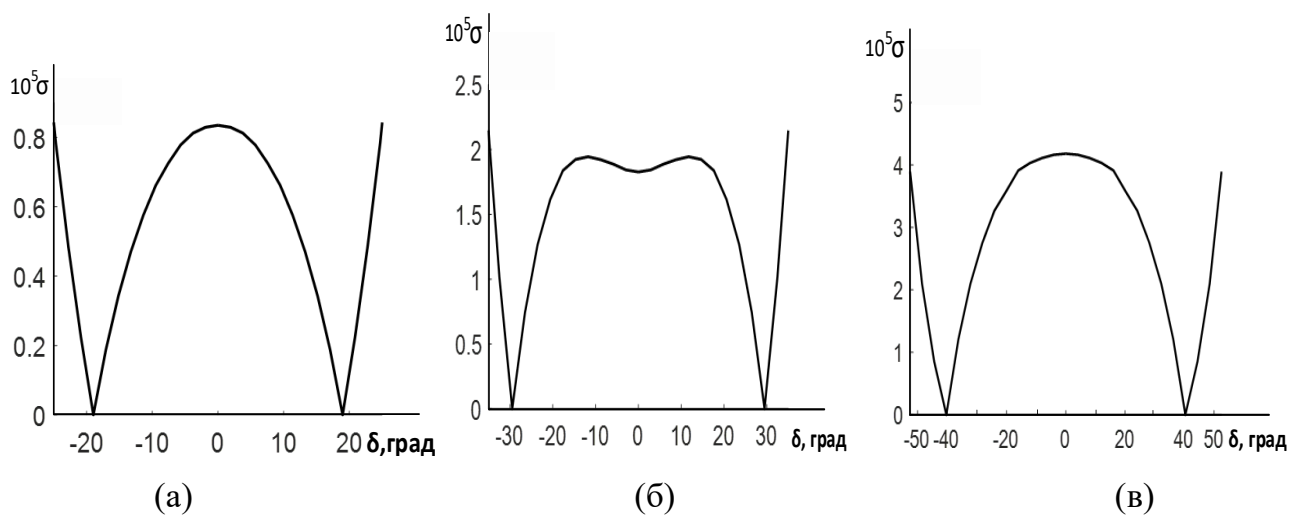


Рис. 3. Зависимость СКА оптимальной бифокальной двухзеркальной системы от угла зрения: а) $x_0=0.0175$, $f=1.695$, $p=1.784$; б) $x_0=0.028$, $f=1.139$, $p=1.287$; в) $x_0=0.042$, $f=1.793$, $p=2.306$.

Как видно на рис.2 и рис.3, минимальные величины СКА для углов зрения 50° , 70° и 105° равны: 8×10^{-6} , 2.2×10^{-5} и 4.1×10^{-5} , соответственно.

Во второй главе рассмотрены задачи синтеза и оптимизации цилиндрических зеркально-линзовых бифокальных систем.

В разделе 2.1. описана методика синтеза поверхности диэлектрической линзы и зеркала, примыкающего ко второй поверхности линзы. Как и ранее, функция, описывающая начальный участок линзы, задана в виде полинома 2-го порядка, а форма

начального участка зеркала находится из условия формирования плоского фронта при нахождении источника цилиндрической волны на оси системы (в точке F_0 , рис.5). Координаты начального участка зеркала определяется формулой.

$$\begin{aligned}
 x_Q &= x_P + \frac{f_0 + nb + y_P - \sqrt{x_P^2 + (f_0 + b - y_P)^2}}{(n^2 \sqrt{1 + y_P'^2}) + \sqrt{(n^2 + S_{FP}^2 - S_{FP} y_P')}} (y_P' \sqrt{(n^2 + S_{FP}^2 + S_{FP})}), \\
 y_Q &= y_P + \frac{f_0 + nb + y_P - \sqrt{x_P^2 + (f_0 + b - y_P)^2}}{(n^2 \sqrt{1 + y_P'^2}) + \sqrt{(n^2 + S_{FP}^2 - S_{FP} y_P')}} (\sqrt{(n^2 + S_{FP}^2 - S_{FP} y_P')}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где
$$S_{FP} = \frac{x_P - y_P'(b + f_0 - y_P)}{\sqrt{(x_P - y_P'(b + f_0 - y_P))^2 + (x_P y_P' + b + f_0 - y_P)^2}},$$

Остальные обозначения понятны из рис.4.

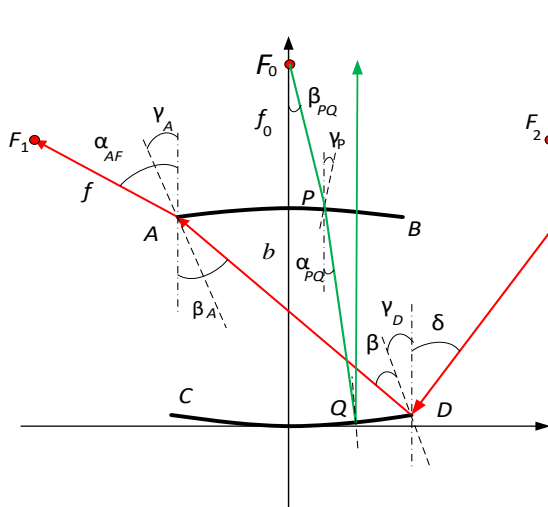


Рис. 4. Начальные участки зеркально-линзовой системы

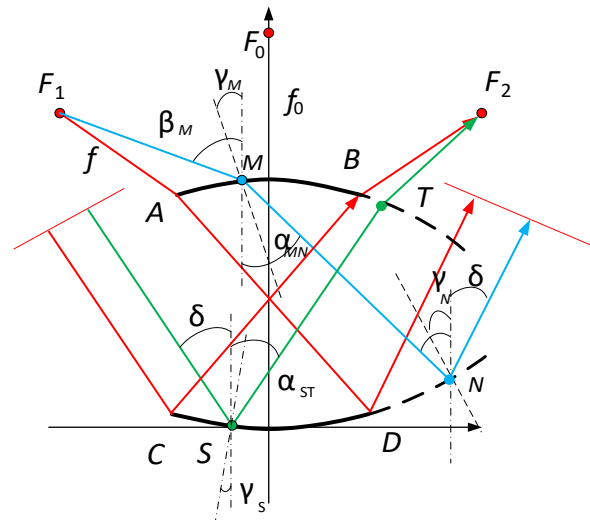


Рис. 5. К определению новых участков зеркально-линзовой системы

Из условия непрерывности функций, описывающих поверхности зеркала и линзы и их производных на стыках участков, находим координаты фокусов:

$$\begin{aligned}
x_{F1} &= -x_0 - f \frac{nS_{AD} - y_0' \sqrt{1 - n^2 S_{AD}^2}}{\sqrt{(1 + y_0'^2)}}; x_{F2} = -x_{F1}; \\
y_{F1} &= y_0 - f \frac{nS_{AD} y_0' + \sqrt{1 - n^2 S_{AD}^2}}{\sqrt{(1 + y_0'^2)}}; y_{F2} = y_{F1};
\end{aligned} \tag{3}$$

где
$$S_{AD} = \frac{(x_D - x_A) + y_A'(y_D - y_A)}{\sqrt{((x_D - x_A) + y_A'(y_D - y_A))^2 + ((x_D - x_A)y_A' - (y_D - y_A))^2}}$$

Для определения новых участков зеркал используется алгоритм последовательного синтеза из условия формирования плоского фронта при нахождении источника в фокусах F_1 и F_2 (рис. 5).

Координаты нового участка линзы определяются формулой:

$$\begin{aligned}
x_T &= x_S + l_{ST} \sin(\alpha_{ST}), \\
y_T &= y_S + l_{ST} \cos(\alpha_{ST}).
\end{aligned} \tag{4}$$

где
$$l_{ST} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - A \cdot C}}{A}; d_{SC} = (x_S - x_C) \sin(\delta) - (y_S - y_C) \cos(\delta);$$

$$A = n^2 - 1; B = (x_{F2} - x_S) \sin(\alpha_{ST}) + (y_{F2} - y_S) \cos(\alpha_{ST}) + n(d_{SC} - f - l_0);$$

$$C = (d_{SC} - f - l_0)^2 + (x_S - x_{F2})^2 - (y_S - y_{F2})^2; y_S' = \left. \frac{dy_2}{dx} \right|_{x = x_S};$$

$$\alpha_{ST} = \arcsin\left(\frac{W(1 + y_D' y_S') + (y_D' - y_S') \sqrt{1 - W^2}}{\sqrt{(y_D' - y_S')^2 + (1 + y_D' y_S')^2}}\right) - \arctg(y_S');$$

$$W = \frac{((x_D - x_A) - y_D'(y_D - y_A))}{\sqrt{((x_D - x_A) - y_D'(y_D - y_A))^2 + ((x_D - x_A)y_D' + (y_D - y_A))^2}}$$

Координаты нового участка зеркала определяются формулой.

$$\begin{aligned}
x_N &= x_M + l_{MN} \sin(\alpha_{MN}), \\
y_N &= y_M - l_{MN} \cos(\alpha_{MN})
\end{aligned} \tag{5}$$

где
$$l_{MN} = \frac{f - \sqrt{(x_M - x_{F1})^2 + (y_M - y_{F1})^2} + nl_0 + (x_M - x_A) \sin(\delta) + (y_M - y_A) \cos(\delta)}{n - \sin(\alpha_{MN}) \sin(\delta) + \cos(\alpha_{NM}) \cos(\delta)};$$

$$\alpha_{MN} = \arcsin\left(\frac{(x_M - x_{F1}) - y'_M(y_M - y_F)}{n\sqrt{((x_M - x_{F1}) - y'_M(y_M - y_F))^2 + ((x_M - x_{F1})y'_M + (y_M - y_F))^2}}\right) + \arctg(-y'_M);$$

$$l_0 = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2}; \quad y'_M = \left. \frac{dy_1}{dx} \right|_{x = x_M};$$

Для обеспечения непрерывности первых и вторых производных линзы и зеркала, найдено трансцендентное уравнение относительно коэффициентов полинома, описывающей начальный участок линзы, решение которого обеспечивает непрерывность вторых производных в стыках.

В разделе 2.2 исследованы возможности оптимизации параметров с целью минимизации величины СКА при фиксированной толщине линзы и угле зрения бифокальной системы, который определяется отношением полуразмера начального отрезка линзы x_0 к b . Параметрами оптимизации являются расстояние f от конца начального отрезка до фокуса F_1 , расстояние f_0 от центральной точки поверхности линзы до фокуса начальной системы F_0 . На плоскости этих параметров для углов зрения 50° , 70° и 100° градусов найдены границы существования решения задачи синтеза и приведены зависимости величины СКА зеркально-линзовой системы от угла зрения (рис.6).

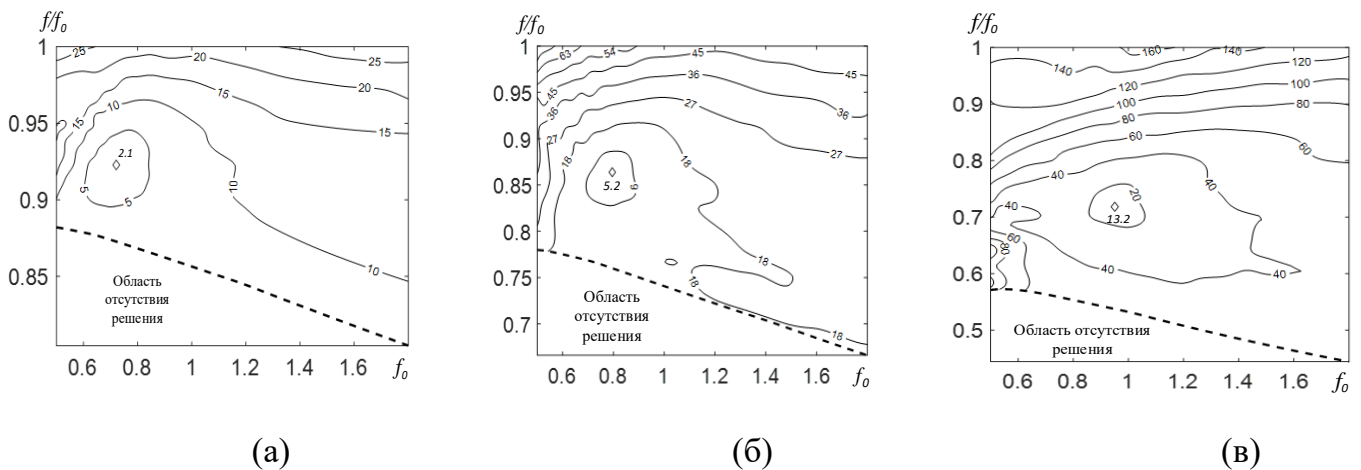


Рис. 6. Линии уровня $10^5\sigma$ бифокальной зеркально-линзовой системы с коэффициентом преломления $n= 1.5$ и толщиной $b = 0.102$ при $x_0= 0.0129$ (а), 0.0181 (б) и 0.0265 (в).

На рис.7 приведены зависимости СКА зеркально-линзовой системы от угла зрения.

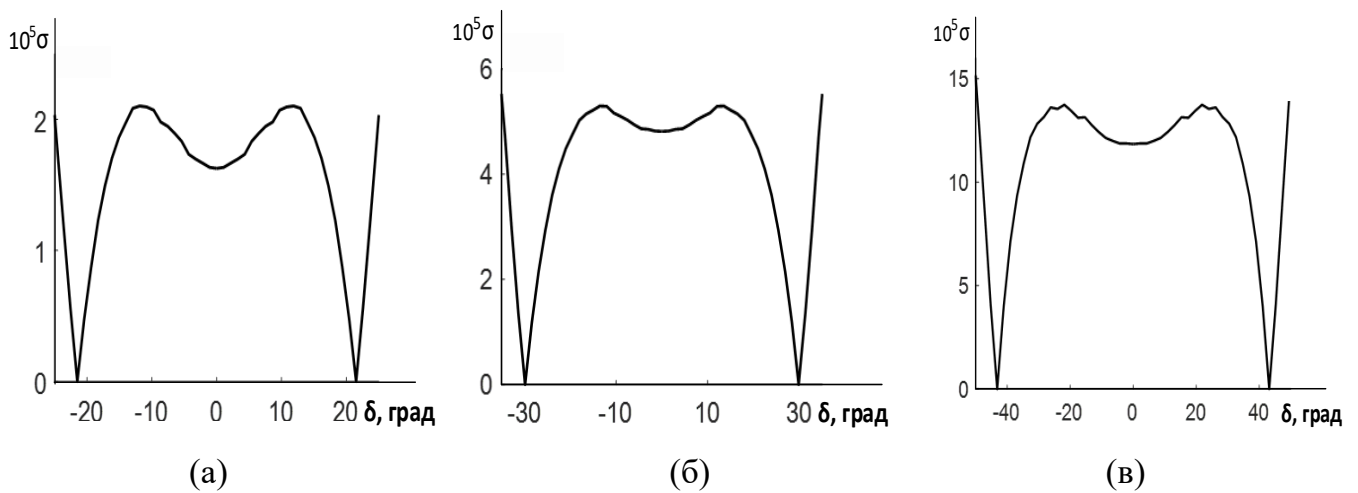


Рис. 7. Зависимость величины $10^5\sigma$ от угла зрения оптимальной бифокальной зеркально-линзовой системы с $n= 1.5$, $b = 0.1024$ и тремя наборами оптимальных параметров: а) $f= 0.666$, $f_0= 0.722$, $x_0= 0.0129$; б) $f= 0.685$, $f_0= 0.794$, $x_0= 0.01812$; в) $f= 0.683$, $f_0= 0.951$, $x_0= 0.0265$.

Как видно на рис.7, максимальная величина СКА зеркально-линзовых систем с оптимальными параметрами для углов зрения 50° , 70° и 100° составляет, соответственно, 2.1×10^{-5} , 5.2×10^{-5} и 1.3×10^{-4} .

В третьей главе рассмотрены задачи синтеза и оптимизации цилиндрических и трехмерных диэлектрических линз (с фокусировкой в двух плоскостях).

В разделе 3.1 рассмотрены задачи синтеза и оптимизации цилиндрических диэлектрических бифокальных линз с целью реализации минимальной величины СКА. Методика синтеза аналогична методике, описанной в предыдущей главе. Исследованы возможности оптимизации параметров с целью минимизации величины СКА при фиксированном толщине линзы и угле зрения бифокальной системы, который определяется отношением полуразмера начального отрезка линзы x_0 к b . Параметрами оптимизации являются расстояние f от конца начального отрезка до фокуса F_1 , расстояние f_0 от центральной точки первой поверхности линзы до фокуса начальной системы F_0 . На плоскости этих параметров для углов зрения 40° и 90° найдены границы области существования решения, зависимости величины СКА от параметров оптимизации и набор параметров, обеспечивающих ее минимальное значение (рис.8).

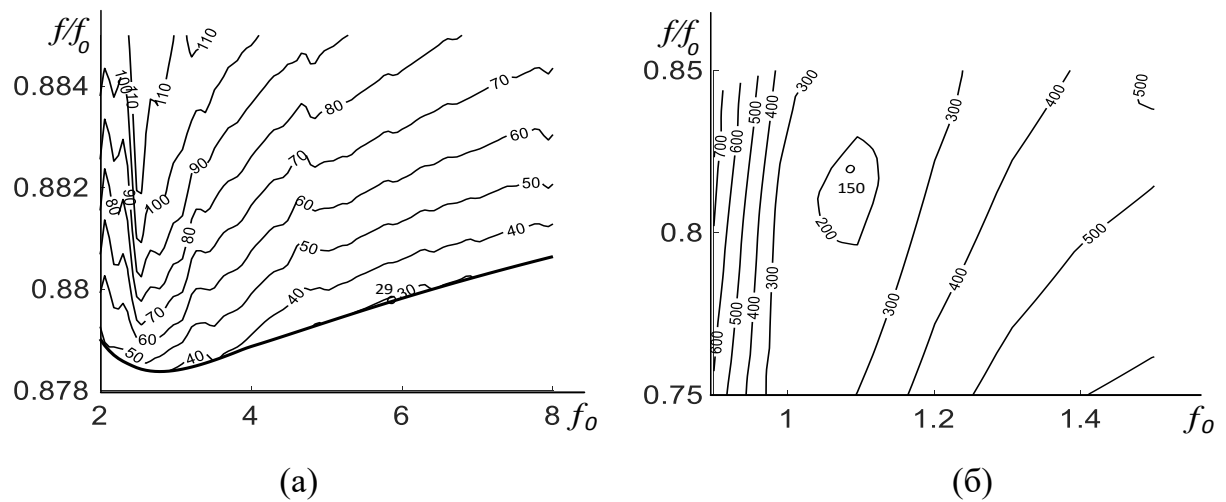


Рис.8. Линии уровня $\sigma \times 10^6$ бифокальной линзы с коэффициентом преломления $n=1.6$, $b=1$: а) $x_0=0.95$ (угол зрения 40°); б) $x_0=0.2$ (угол зрения 90°).

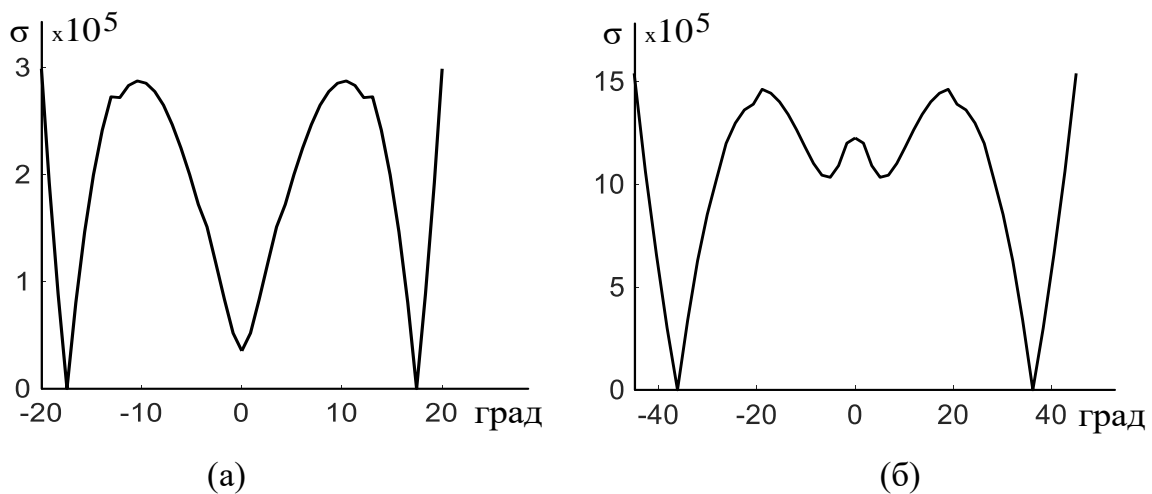


Рис.9. Зависимости величины $\sigma \times 10^5$ бифокальных линз с минимальной СКА для углов зрения а) 40° ($f_0=5.9$, $f=5.191$); б) 90° ($f_0=1.1$, $f=0.891$).

На рис.9 показаны зависимости СКА бифокальных линз с оптимальными параметрами от угла зрения.

В разделе 3.2 рассмотрены задача синтеза трёхмерной диэлектрической бифокальной линзы. Форма начального участка первой поверхности линзы задается в виде полинома двух переменных второго порядка. Для синтеза сечения линзы в плоскости симметрии $z=0$ (рис.10) применяется алгоритм, описанный в разделе 1.1. Далее определяется размер начального участка первой поверхности линзы по x в зависимости от z из условия, чтобы лучи из фокуса F_1 , которые проходят через границы начальных участков первой и второй поверхности линзы выходили из линзы под постоянными углом и удовлетворяли требованию постоянства их эйконалов (до плоского фронта). Новые

участки поверхностей линзы находятся последовательно из условия равенства эконоалов лучей. Геометрия входной и выходной поверхности трехмерной бифокальной диэлектрической линзы с показателем преломления $n = 1.84$, толщиной, равной 0.7 и фокусным расстоянием, равным 1.1, синтезированной для угла зрения 90° показана на рис.10.

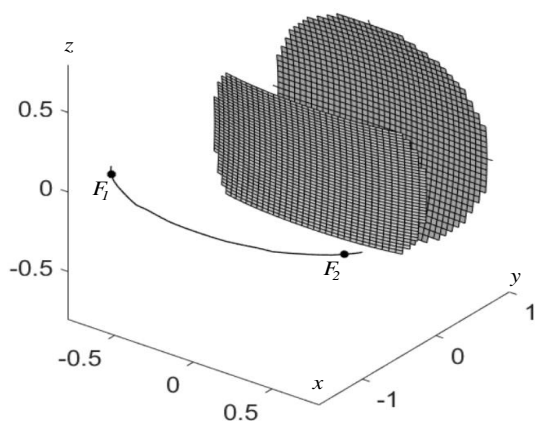


Рис. 10. Геометрия входной и выходной поверхности трехмерной линзы.

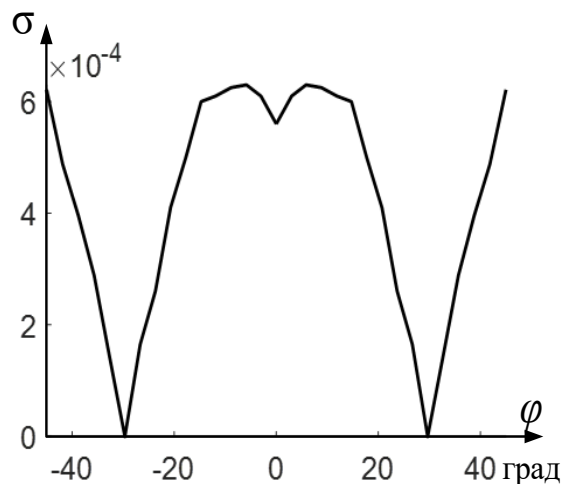
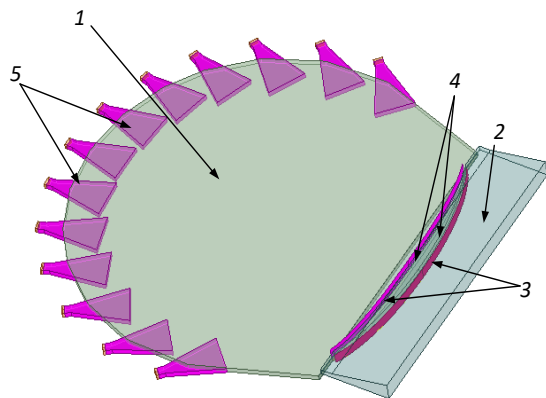


Рис. 11. Зависимость СКА линзы от угла зрения

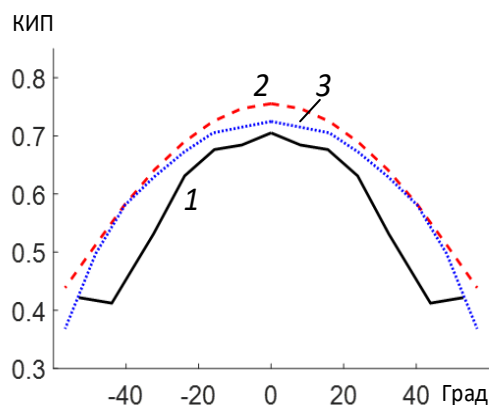
На рис.11 показана зависимость СКА синтезированной линзы от угла зрения.

В четвертой главе исследованы многолучевые антенны на основе синтезированных и оптимизированных бифокальных систем.

В разделе 4.1 с использованием МКЭ и в приближении Кирхгофа исследованы характеристики многолучевых антенн на основе планарных бифокальных двухзеркальных систем с минимальной СКА (рис. 12), с компактной облучающей системой и с использованием оптимизации по максимуму величины КИП (рис.13).



(а)



(б)

Рис. 12. Многолучевая антенна на основе двухзеркальной бифокальной системы с минимальной СКА (а), зависимости КИП от угла обзора (б): 1- $D=20\lambda$ МКЭ, 2- $D=20\lambda$, Кирхгоф, 3- $D=1000\lambda$, Кирхгоф.

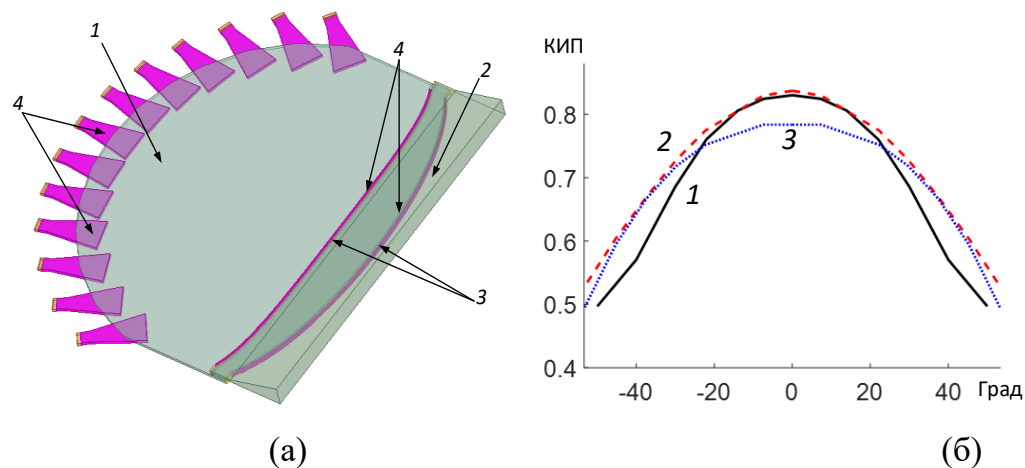


Рис. 13. Многолучевая антенна на основе двухзеркальной бифокальной системы с оптимизацией по КИПу (а), зависимости КИП от угла обзора (б): 1- $D=20\lambda$, МКЭ; 2- $D=20\lambda$, Кирхгоф, 3- $D=100\lambda$, Кирхгоф.

В разделе 4.2 главы с использованием МКЭ и в приближении Кирхгофа исследованы характеристики многолучевых антенн с широким углом обзора на основе планарных бифокальных зеркально-линзовых систем с минимальной СКА (рис.14) и с компактной облучающей системой (рис.15).

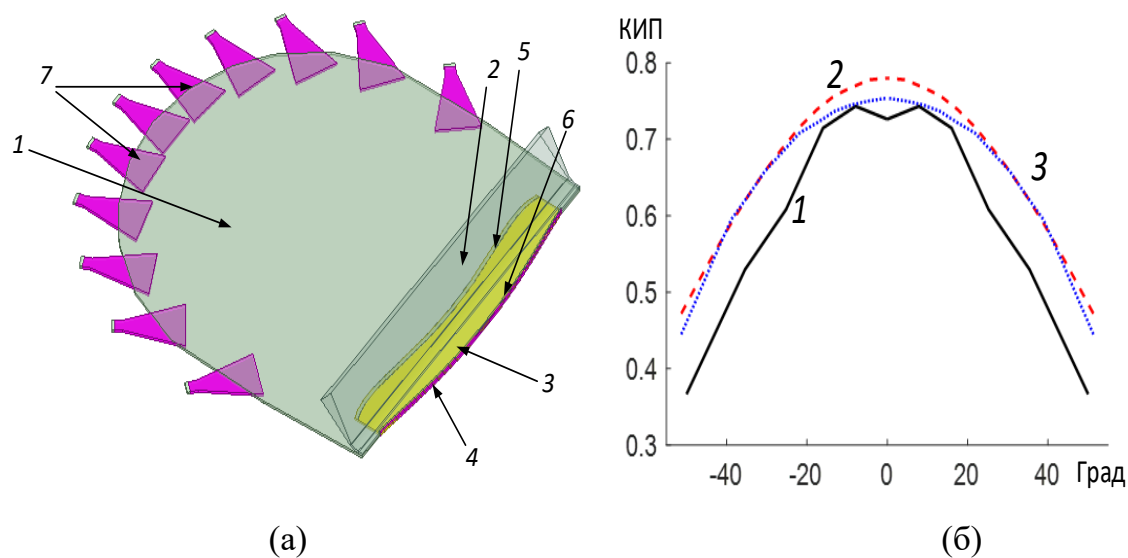


Рис. 14. Многолучевая антенна на основе планарной зеркально-линзовой системы с минимальной СКА (а), зависимости КИП от угла обзора (б): 1- $D=20\lambda$, МКЭ, 2- $D=20\lambda$, Кирхгоф, 3- $D=500\lambda$, Кирхгоф.

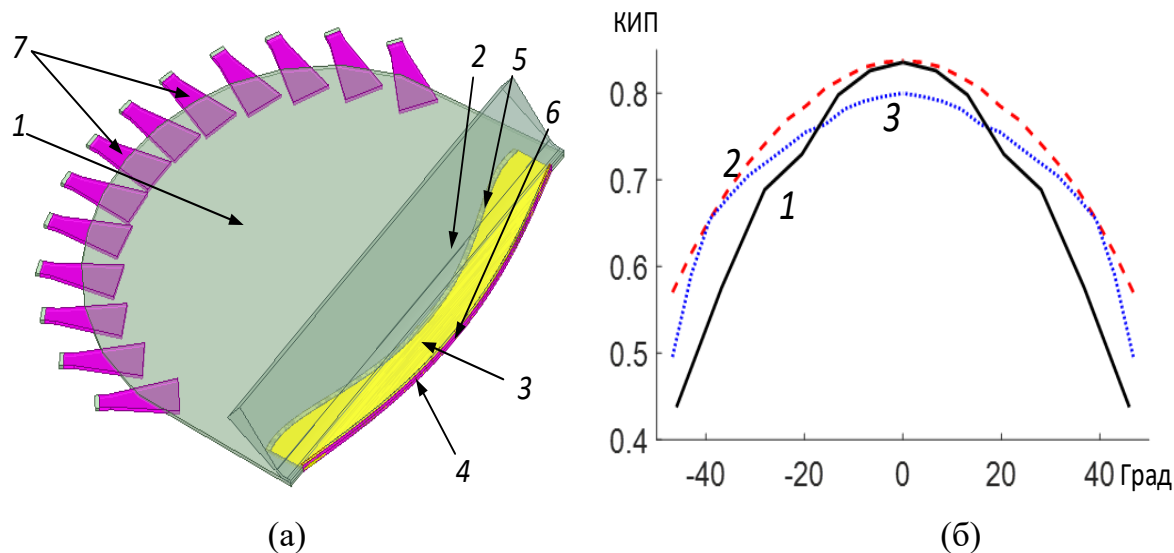
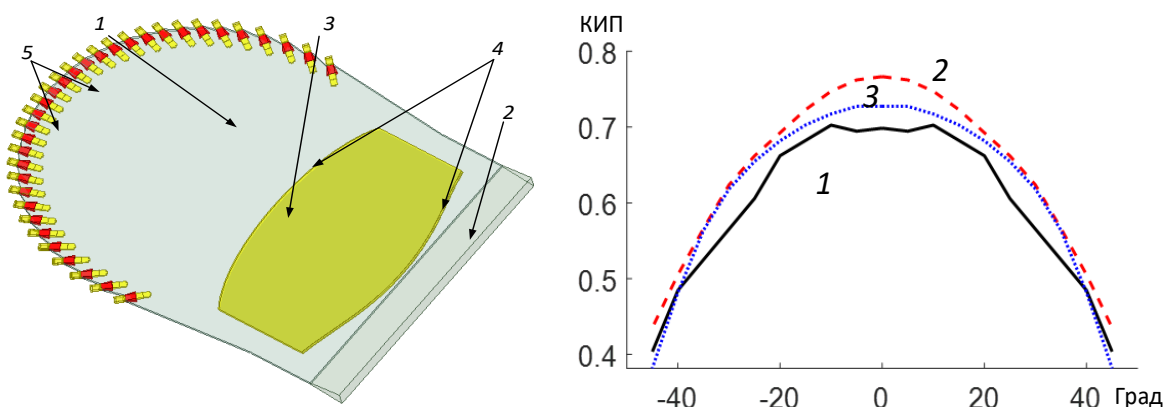


Рис. 15. Многолучевая антенна на основе планарной зеркально-линзовой системы с компактной облучающей системой (а), зависимости КИП от угла обзора (б): 1- $D=20\lambda$, МКЭ, 2- $D=20\lambda$, Кирхгоф, 3- $D=100\lambda$, Кирхгоф.

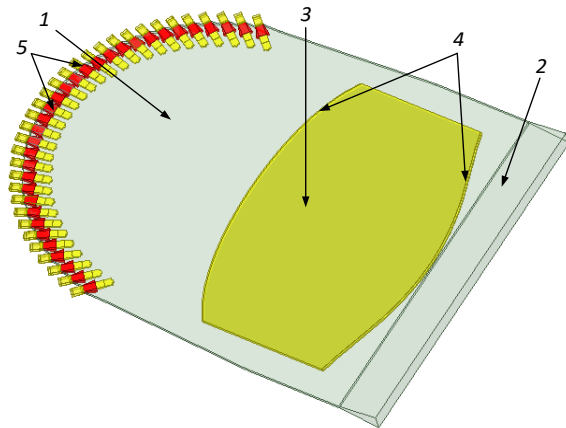
В разделе 4.3 с использованием МКЭ и в приближении Кирхгофа исследованы характеристики многолучевых антенн с широким углом обзора на основе планарных бифокальных линзовых систем с минимальной СКА (рис. 16) и с компактной облучающей системой (рис. 17). Проведены измерения зависимости коэффициента усиления от угла обзора ракетного многолучевой антенны на основе планарной бифокальной диэлектрической линзы (рис. 18).



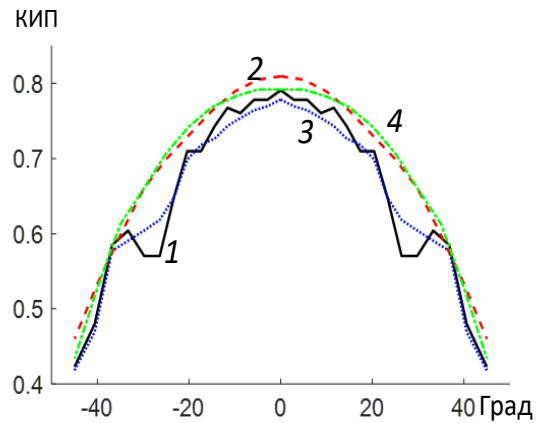
(a)

(б)

Рис. 16. Многолучевая антенна на основе бифокальной диэлектрической линзы с минимальной СКА (а), зависимости КИПот угла обзора (б): 1- $D=27.5\lambda$, МКЭ, 2- $D=27.5\lambda$, Кирхгоф, 3- $D=350\lambda$, Кирхгоф.



(a)



(б)

Рис. 17. Многолучевая антенна на основе бифокальной диэлектрической линзы с компактной облучающей системой (а), зависимости КИП от угла обзора (б): 1- $D=28.8\lambda$, МКЭ; 2- $D=58\lambda$, Кирхгоф; 3- $D=28.8\lambda$, МКЭ; 4- $D=58\lambda$, Кирхгоф.

Чтобы увеличить число лучей в заданном угле обзора разработан метало-диэлектрический облучатель (рис. 18), который состоит из металлического рупора (1) и выступающего из него диэлектрического стержня из полистирола прямоугольного сечения, ступенчато-нерегулярного в Е- плоскости (2). Нерегулярные части стержня (3) обеспечивают согласование излучателя с полым волноводом в полосе частот более 25 % по уровню -15 дБ.

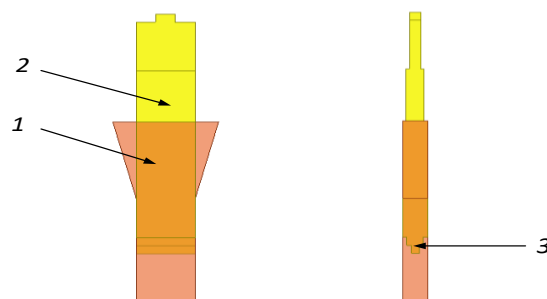


Рис. 18. Метало-диэлектрический облучатель: 1-Н-секториальный рупор, 2- диэлектрический стержень, 3- согласующая часть стержня.

Для проверки результатов моделирования был изготовлен экспериментальный образец многолучевой антенны на основе планарной бифокальной линзы толщиной 3мм и $D= 288\text{мм}$ (рис.19). Справа на фотографии показана диэлектрическая линза. Размер рупора в Е-плоскости-18.5 мм, в Н-плоскости 400 мм, рабочая часть (часть планарного волновода и рупора закрыта поглотителем) 340 мм. Для учета взаимодействия облучателей рядом с активным излучателем расположены по одному пассивному, нагруженному на согласованную нагрузку.

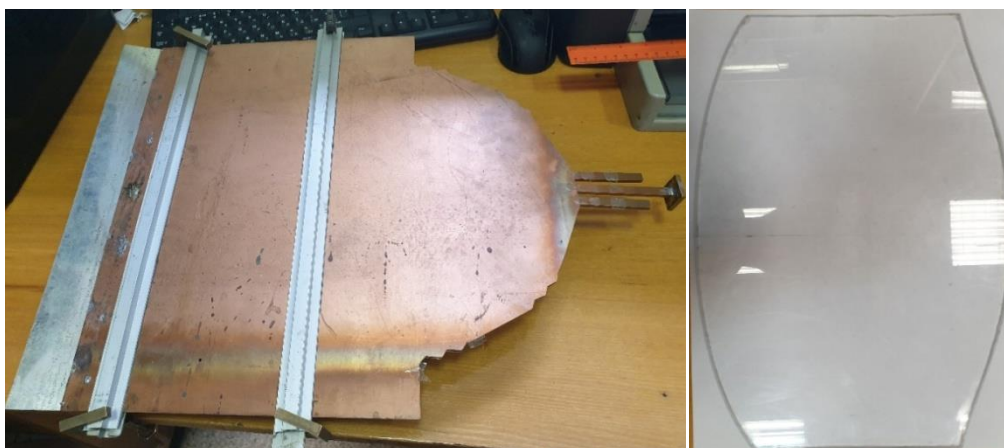


Рис.19. Фото экспериментального образца многолучевой антенны на основе бифокальной диэлектрической линзы.

На рис.20 приведены зависимости КУ и КИП экспериментального образца от угла обзора.

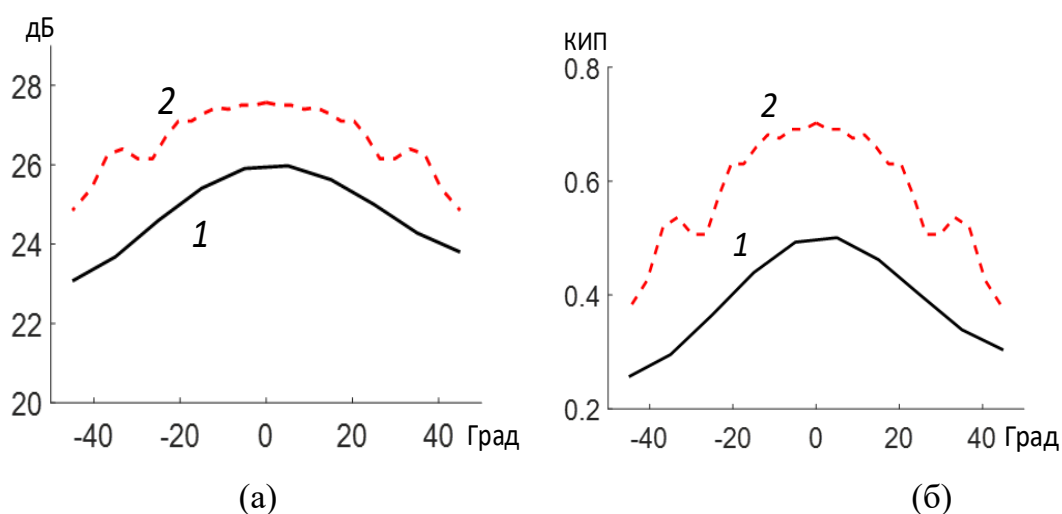


Рис.20. Зависимости КУ (а) и КИП (б) экспериментального образца многолучевой антенны на основе бифокальной линзы от угла обзора: 1- результаты измерений; 2- результаты моделирования с использованием МКЭ.

В разделе 4.4 в приближении Кирхгофа исследованы характеристики многолучевой антенны на основе трехмерной бифокальной линзы (рис.21), синтезированной в разделе 3.2.

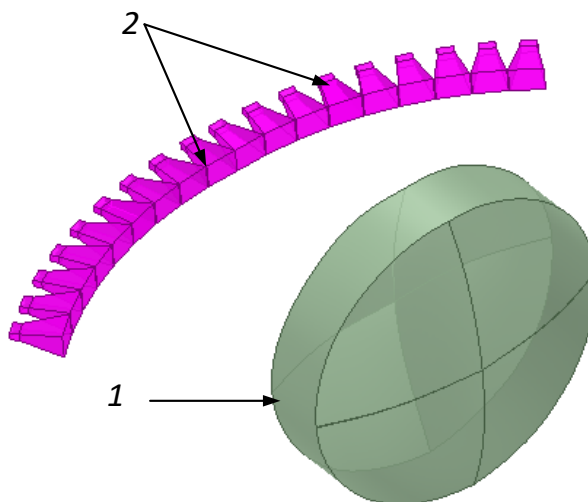


Рис. 21. Многолучевая антенна на основе трехмерной бифокальной диэлектрической линзы, 1-трехмерная бифокальная диэлектрическая линза, 2-облучатели.

В качестве облучателей использованы пирамидальные рупоры. Зависимости КУ и КИП антенны от угла обзора показаны на рис.22.

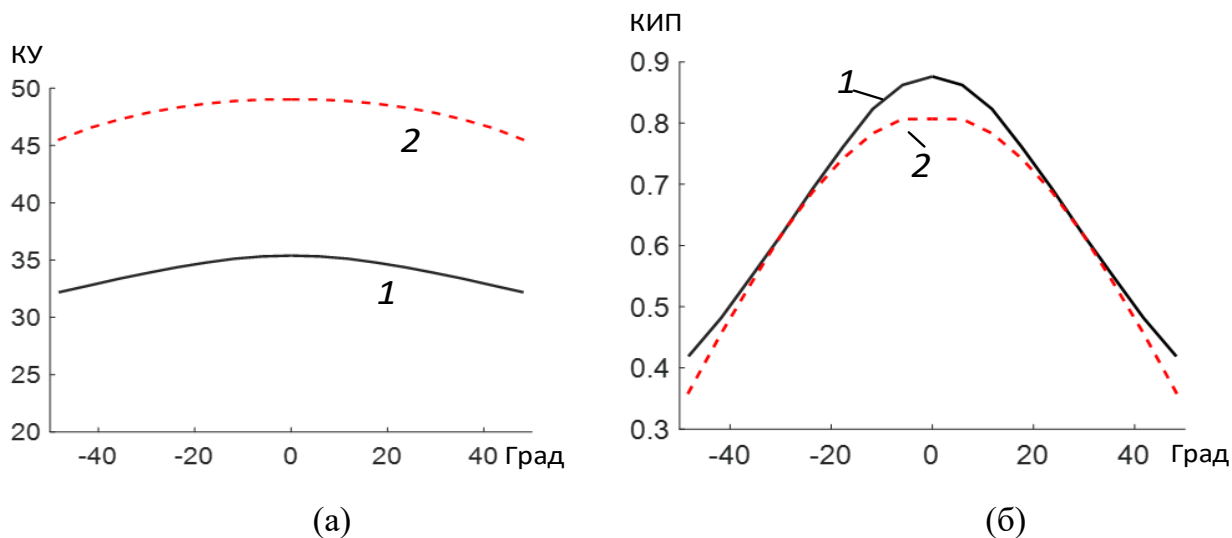


Рис.22. Зависимости от угла обзора коэффициента усиления (а) и величины КИП (б) многолучевой антенны на основе трехмерной бифокальной диэлектрической линзы: 1- $D=20\lambda$, 2- $D=100\lambda$.

В **Заключении** приведены основные результаты исследований и указаны возможные варианты их использования, в том числе с учетом результатов, полученных в Приложениях.

В **Приложении 1** проведено исследование волноводно-щелевой антенной решетки с бифокальной зеркально-линзовой ДОС.

В **Приложении 2** синтезирована цилиндрическая двухзеркальная система с высокой величиной КИП, для облучения которой можно использовать ДОС на основе синтезированных в работе бифокальных систем.

Основные результаты работы:

1. Развита численно-аналитическая методика синтеза бифокальных цилиндрических двухзеркальных, диэлектрических линзовых и зеркально-линзовых систем с минимальными aberrациями.
2. Синтезированы и оптимизированы двухзеркальные цилиндрические бифокальные системы с СКА: 8×10^{-6} в угле зрения 50° , 2×10^{-5} в угле зрения 70° и 4×10^{-5} в угле зрения 105° .
3. Синтезированы и оптимизированы зеркально-линзовые цилиндрические бифокальные системы с СКА: 2×10^{-5} в угле зрения 50° , 5×10^{-5} в угле зрения 70° и 1.3×10^{-4} в угле зрения 100° .
4. Синтезированы и оптимизированы линзовые цилиндрические бифокальные системы с СКА: 3×10^{-5} в угле зрения 40° , 1.5×10^{-4} в угле зрения 90° .
5. Синтезирована трехмерная бифокальная диэлектрическая линза с СКА 6×10^{-4} в угле зрения 90° .
6. С использованием численного моделирования исследованы широкоугольные многолучевые антенны на основе оптимизированных бифокальных систем.
7. Разработана конструкция экспериментального макета многолучевой антенны на основе бифокальной цилиндрической диэлектрической линзы с углом зрения 90° и проведены измерения ее характеристик.

Список публикаций

1. Калошин В.А., Ле Д.Т., Ви У.Н. Многолучевые волноводно-щелевые антенные решетки с бифокальными диаграммо-образующими системами и широким сектором частотного сканирования // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/13/text.pdf>.
2. Калошин В.А., Ви Ут Нам. Двухзеркальная цилиндрическая антенная система с высоким коэффициентом использования поверхности. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.19>.
3. В.А.Калошин, Ви Ут Нам. Синтез двухзеркальной бифокальной цилиндрической системы с минимальными аберрациями // РЭ. 2022. Т.67. №2. С.140-148. DOI: 10.31857/S003384942202005X.
4. В.А.Калошин, Ви Ут Нам. Синтез бифокальных диэлектрических линз // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.11>.
5. В.А.Калошин, Ви Ут Нам. Синтез зеркально-линзовой бифокальной цилиндрической системы с минимальными аберрациями // РЭ. 2022. Т.67. №3. С.249-258. DOI: 10.31857/S0033849422020061.
6. В.А.Калошин, Ви Ут Нам. Широкоугольные многолучевые антенны на основе бифокальных систем // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2022. №3. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.3.2>
7. V.A. Kaloshin, Vi Ut Nam. Synthesis of Planar Bifocal Two Mirror, Lens and Mirror-Lens Beamforming Systems. 2021 *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, pp. 159-162, doi: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494139.