РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2022, том 67, № 2, с. 140–148

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

СИНТЕЗ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ БИФОКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МИНИМАЛЬНЫМИ АБЕРРАЦИЯМИ

© 2022 г. В. А. Калошин[a], *, Ви Ут Нам[b]

[a] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125007 Российская Федерация

[b] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

*E-mail: vak@cplire.ru

Поступила в редакцию 12.01.2021 г.
После доработки 10.03.2021 г.
Принята к публикации 17.03.2021 г.

Развита методика синтеза цилиндрических двухзеркальных бифокальных систем с использованием последовательного нахождения участков зеркал и заданием начального участка вспомогательного зеркала в виде полинома второй и четвертой степени. Один из коэффициентов полиномов определен в результате решения найденного в работе уравнения, которое в общем случае обеспечивает непрерывность вторых производных функций,описывающих поверхности зеркал. Начальный участок главного зеркала найден в результате решения задачи синтеза плоского фронта для центрального положения источника. Определены параметры оптимизации с целью минимизации величины средне-квадратической аберрации при фиксированном расстоянии между зеркалами и угле зрения бифокальной системы. На плоскости этих параметров для углов зрения 50, 70 и 105 град найдены границы области существования решения задачи синтеза и приведены зависимости величины средне-квадратической аберрации от параметров, при этом показано, что ее минимум достигается на границе области существования решения и найден набор параметров, обеспечивающих этот минимум.

DOI: 10.31857/S003384942202005X

ВВЕДЕНИЕ

Бифокальные двухзеркальные системы позволяют расширить угол зрения по сравнению с однозеркальными и апланатическими двухзеркальными системами. В связи с этим синтезу бифокальных систем посвящено большое количество работ [1–14].

В работе [14] на основе известного подхода [1–6] развита методика точного решения задачи синтеза цилиндрических бифокальных двухзеркальных систем в приближении геометрической оптики. В рамках развитой методики осуществлен выбор начальных участков зеркал и обеспечена непрерывность функций, описывающих форму зеркал, и их производных. Непрерывность вторых производных этих функций, которая обеспечивает непрерывность отраженных полей в первом приближении геометрической оптики, была реализована приближенно. Форма начальных участков зеркал при этом задавалась в виде отрезков парабол, один из коэффициентов которых был найден путем численной минимизации скачка второй производной на границах соседних участков зеркал. При этом вопрос о том, обеспечивают ли найденные решения задачи синтеза двухзеркальной системы для заданного угла зрения минимальную среднеквадратическую аберрацию (СКА) остался открытым.

Цель данной работы – дальнейшее развитие методики синтеза и оптимизации цилиндрических бифокальных двухзеркальных систем с целью реализации минимальной СКА в заданном угле зрения. При этом в процессе синтеза задается начальный участок только одного из зеркал.

1. МЕТОДИКА СИНТЕЗА БИФОКАЛЬНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим задачу синтеза цилиндрической бифокальной двухзеркальной системы, с одной стороны которой расположены два симметричных относительно оси y (рис. 1) фокуса (точки идеальной фокусировки F_1 и F_2) с декартовыми координатами (x_{F_1}, y_{F_1}) и (x_{F_2}, y_{F_2}). При положении источника цилиндрической волны в каждом из этих фокусов с другой стороны бифокальной системы формируются два симметричных относительно оси y плоских фронта.

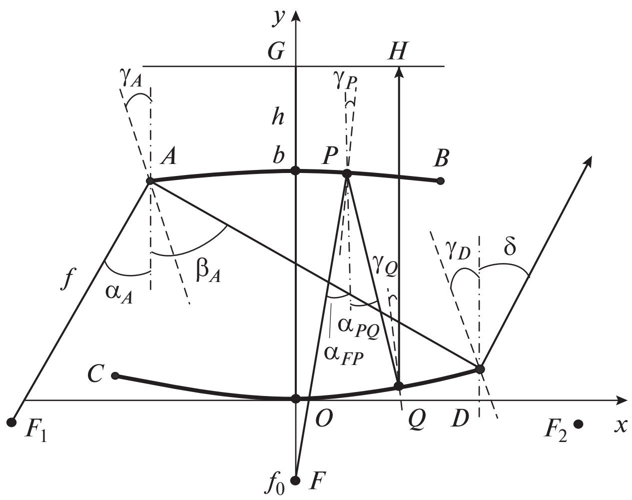

Рис. 1. Начальные участки зеркал.

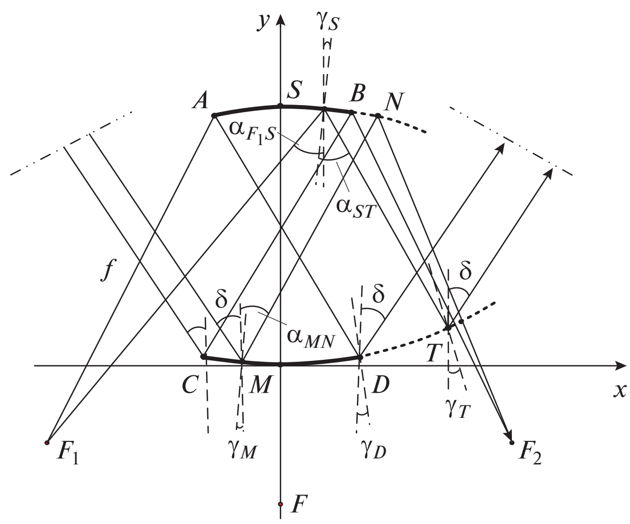

Рис. 2. К определению новых участков зеркал.

Пусть форма вспомогательного (первого) и основного (второго) зеркала описываются неизвестными четными фунциями $y_1(x)$ и $y_2(x)$ соответственно, а функция $y_{10}(x)$, описывающая начальный участок вспомогательного зеркала, задана, т.е. на интервале $[-x_0, x_0]$ функция $y_1(x) = y_{10}(x)$ известна. При этом поверхности первого и второго зеркал пересекают ось y в точках $(0, b)$ и $(0, 0)$ соответственно (рис. 1). Потребуем, чтобы лучи из источника, расположенного в точке F_0 с координатами $(0, -f_0)$ после двух отражений от зеркал формировали плоский фронт $y = h$, где h – произвольная постоянная. При этом луч, идущий вдоль оси y, падает на первое зеркало в точке $(0, b)$, отражается от него, падает на второе зеркало в точке $(0, 0)$, снова отражается и снова идет вдоль оси y. Эйконал от источника до фронта этого (осевого) луча имеет вид

$$L_0 = f_0 + 2b + h. \tag{1}$$

Пусть другой луч, выходящий из точки F_0, падает на первое зеркало в точке P с координатами (x_P, y_P), отражается от него, падает на второе зеркало в точке Q с координатами (x_Q, y_Q) и отражается от него параллельно оси y. При этом его эйконал определяется формулой

$$L = \sqrt{{x_P}^2 + (y_P + f_0)^2} + PQ + h - y_P - PQ\cos(\alpha_{PQ}), \tag{2}$$

где $\alpha_{PQ} = \alpha_{FP} - 2\gamma_p$ – угол межу осью y и отрезком PQ; $\alpha_{FP} = \mathrm{arctg}\,(x_P/(y_P - y_F))$ – угол между осью y и падающим лучом в точке P; $\gamma_P = \mathrm{arctg}(y'_{10}(x_P))$ – угол между осью y и нормалью первому зеркалу в точке P; PQ – расстояние от точки P до точки Q.

Потребуем, чтобы все лучи, выходящие из точки F после двух отражений от зеркал, были параллельно оси y и формировали плоский фронт на выходе системы. Для этого необходимо равенство эйконалов всех лучей (от источника до фронта). Потребуем, чтобы эйконалы всех лучей были равны эйконалу центрального луча:

$$\sqrt{x_P^2 + (y_P + f_0)^2} + PQ - y_P - PQ\cos(\alpha_{PQ}) = f_0 + 2b. \tag{3}$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$PQ = \frac{f_0 + 2b + y_p - \sqrt{x_P^2 + (y_P + f_0)^2}}{(1 - \cos(\alpha_{PQ}))}. \tag{4}$$

Зная расстояние от точки P до точки Q и угол α_{PQ}, нетрудно найти координаты точки Q:

$$x_Q = x_P + PQ\sin(\alpha_{PQ}),\quad y_Q = y_P + PQ\cos(\alpha_{PQ}). \tag{5}$$

Множество точек Q образует начальный участок второго зеркала.

Для реализации на стыках начальных участков с соседними непрерывности функций, описывающих форму поверхности зеркал и их производных, необходимо, чтобы луч плоской волны, падающей на зеркало под углом к оси yпосле отражения в точке D попадал в точку A, а после отражения в точке A – в фокус F_1. Из геометрии, представленной на рис. 2, нетрудно найти координаты этого фокуса, а также фокуса F_2, учитывая, что он симметричен фокусу F_1 относительно оси y:

$$x_{F_1} = x_A - f\sin(\alpha_{AF_1}),$$
$$y_{F_1} = y_A - f\cos(\alpha_{AF_1}), \tag{6}$$
$$x_{F_2} = -x_{F_1};\;\; y_{F_2} = y_{F_1},$$

где $x_A = -x_0$; $y_A = y(-x_0)$; $\alpha_{AF_1} = \operatorname{arctg}\left((x_D - x_A)/(y_D - y_A)\right) + 2\operatorname{arctg}(y'(x_A))$ – угол между осью y и линией, соединяющей фокус F_1 с краем (точка A) начального участка вспомогательного зеркала; f – расстояние от края начального участка до фокуса.

Рассмотрим луч, который из фокуса F_1 падает на первое зеркало в точке A, отражается и падает на второе зеркало в точке D. Из геометриина рис. 1 следует, что угол выхода луча из системы определяется формулой

$$\delta = \alpha_{AD} - 2\operatorname{arctg}(y_2'(x_D)), \tag{7}$$

где $y_2'(x_D)$ – первая производная функции $y_2(x)$ в точке D.

Для определения нового участка второго зеркала предложим, что луч из фокуса F_1 падает на начальный участок первого зеркала, отражается от него в точке S с координатами (x_S, y_S), падает на второе зеркало в точке T с координатами (x_T, y_T) и отражается под углом δ (см. рис. 2). Отсюда получаем угол между осью y и падающим от точки F_1 в точку S лучом $\alpha_{F_1S} = \operatorname{arctg}((x_S - x_{F_1})/(y_S - y_{F_1}))$ и угол $\alpha_{ST} = \alpha_{F_1S} - 2\gamma_S$ между осью y и лучом, отраженным от зеркала в точке S.

Для того чтобы двухзеркальная система формировала на выходе плоский фронт, необходимо равенство эйконалов всех лучей, которые выходят из фокуса F_1 и после отражения от зеркал идут параллельно (под углом δ к оси Y). Отсюда получаем уравнение

$$\begin{aligned} &ST + (x_D - x_S - ST\sin(\alpha_{ST}))\sin(\delta) + \\ &+ (y_D - y_S + ST\cos(\alpha_{ST}))\cos(\delta) = \\ &= f_0 + l_0 - \sqrt{(x_{F_1} - x_S)^2 + (y_{F_1} - y_S)^2}, \end{aligned} \tag{8}$$

где $l_0 = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2}$; ST – расстояние от точки S до точки T.

Решение этого уравнения имеет вид

$$ST = \frac{f_0 + l_0 - \sqrt{(x_S - x_{F_1})^2 + (y_S - y_{F_1})^2} + (x_S - x_D)\sin(\delta) + (y_S - y_D)\cos(\delta)}{(1 - \sin(\alpha_{ST})\sin(\delta) + \cos(\alpha_{ST})\cos(\delta))}. \tag{9}$$

Зная длину ST и угол α_{ST}, можно определять координаты точки T по формулам

$$x_T = x_S + ST\sin(\alpha_{ST}),\quad y_T = y_S - ST\cos(\alpha_{ST}). \tag{10}$$

Множество точек T образует новый участок второго зеркала. При этом функция $y_2(x)$ и ее первая производная также непрерывны на стыке начального участка второго зеркала с его новым (соседним) участком.

Для определения нового участка первого зеркала рассмотрим падение плоской волны на второе зеркало. Пусть луч, который падает на начальный участок второго зеркала в точке M с координатами (x_M, y_M) под углом δ к оси y, отражается от второго зеркала и падает на первое зеркало в точке N с координатами (x_N, y_N), снова отражается и проходит через фокус F_2 (см. рис. 2). Угол между осью y и отраженным лучом в точке M равен $\alpha_{MN} = \delta - 2\gamma_M$.

Приравнивая эйконалы лучей, отраженных от разных точек M зеркала, получим уравнение

$$MN + \sqrt{(x_M + MN\sin(\alpha_{MN}) - x_{F2})^2 + (y_N + MN\cos(\alpha_{MN}) - y_{F2})^2} - d_C - l_o - f + d_M = 0, \tag{11}$$

где d_M – расстояние от точки M до фронта волны; d_C – расстояние от точки C до фронта волны.

Решение этого уравнения имеет вид

$$MN = \frac{A^2 - (y_M - y_{F_2})^2 - (x_M - x_{F_2})^2}{2A + 2(x_M - x_{F_2})\sin(\alpha_{MN}) + 2(y_M - y_{F_2})\cos(\alpha_{MN})}, \tag{12}$$

где $A = l_0 + f + 2(x_C - x_M)\sin(\delta) + 2(y_C - y_M)\cos(\delta)$.

Зная расстояние MN и угол α_{MN}, координаты точки N можно найти по формулам

$$x_N = x_M + MN\sin(\alpha_{MN}),$$
$$y_N = y_M + MN\cos(\alpha_{MN}). \tag{13}$$

Множество точек N образует новый участок первого зеркала. При этом фунция $y_1(x)$ и ее первая производная непрывны на стыке начального отрезка с новым.

Для обеспечения непрерывности амплитудного распределения отраженных волн в первом приближении геометрической оптики необходимо,чтобы вторые производные функций, описывающих поверхности зеркал, были непрерывными. Первая производная функции $y_1(x)$ в точке N имеет вид

$$y'_N = \operatorname{tg}(-\gamma_N) = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{MN} - \alpha_{F2}}{2}\right). \tag{14}$$

Так как координаты точки N определяются через координаты точки M, вторую производную второго отрезка первого зеркала в точке N определяем дифференцированием его первой производной в точке N по координате x_M:

$$y''_N(x_M) = \frac{d(y'_N)}{d(x_N)} = \left(\frac{d(y'_N)}{d(x_M)}\right)\Bigg/\left(\frac{d(x_N)}{d(x_M)}\right) = \\ = \frac{(\alpha'_{MN}(x_M) - \alpha'_{F2}(x_M))(1 + y'^2_N)}{2x'_N(x_M)}. \tag{15}$$

Для того чтобы вторая производная первого зеркала на стыках была непрерывной, значение второй производной первого участка в точке B должно равняться значению второй производной в точке N, когда точки M и C совпадают. Заменим x_M на $-x_0$ в выражении для второй производной (15) и приравняем его значению второй производной начального отрезка первого зеркала в точке B. В результате получим уравнение

$$\frac{(y_0'^2 + 2T_0y_0' - 1)x'_N - ((1 - y_0'^2)T_0 - 2y_0')y'_N}{f(y_0'^2 + 1)\sqrt{T_0^2 + 1}} + \alpha'_0 + \frac{2y''_0x'_N}{1 + y_0'^2} = 0, \tag{16}$$

где

$$T_0 = \frac{S_b(f_0 + 2b + y_0 - \sqrt{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2}) + 2x_0(1 + C_b)}{(1 + C_b)C_bl_x}; \quad S_b = \frac{(y'_0(y_0 + f_0) + x_0)}{(1 + y_0)\sqrt{(y_0 + f_0)^2 + x_0^2}};$$

$$C_b = \frac{((y_0 + f_0) + y'_0x_0)}{(1 + y_0)\sqrt{(y_0 + f_0)^2 + x_0^2}}; \quad \beta'_0 = \frac{y_0 + f_0 - x_0y'_0}{x_0^2 + (y_0 + f_0)^2} - \frac{2y''_0}{1 + y_0'^2};$$

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

$$\beta_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_0}{y_0 + f}\right) - \operatorname{arctg}(y'_0); \quad l_x = \frac{f_0 + 2b_1 + 2b_2 + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{1 + C_b};$$

$$\alpha'_0 = \frac{2\beta'_0}{(1 + l_xC_b\beta'_0 + l'_xS_b)}; \quad S_T = \frac{T_0(1 - y_0'^2) + 2y'_0}{(1 + y_0'^2)\sqrt{1 + T_0^2}};$$

$$C_T = \frac{1 - y_0'^2 - 2T_0y_0'^2}{(1 + y_0'^2)\sqrt{1 + T_0^2}}; \quad A = \sqrt{(x_0 + l_xS_b)^2 + l_x^2C_b^2} + f;$$

$$A_1 = \frac{S_b - T_0(1 + C_b)}{(1 + C_b)\sqrt{1 + T_0^2}}; \quad B = A^2 + (l_xC_b - fC_T)^2 - (l_xS_b - fS_T)^2;$$

$$B_1 = 2AA_1 + \frac{2(l_xC_b - fC_T)^2S_b}{1 + C_b} - (l_xS_b - fS_T);$$

$$C_1 = 2A_1 + \frac{2\alpha'(l_{x0}C_b - fC_T - (l_{x0}S_b - fS_T)T_0)}{\sqrt{1 + T_0^2}} - \frac{2S_b}{(1 + C_b)\sqrt{1 + T_0^2}};$$

$$C = 2A + \frac{2(l_xC_b - fC_T)T_0 + 2(l_xS_b - fS_T)}{\sqrt{1 + T_0^2}}; \quad l_0 = \frac{B}{C};$$

$$l'_0 = \frac{B_1C - BC_1}{C^2}; \quad x'_N = 1 + \frac{l'_0T_0}{\sqrt{1 + T_0^2}} + \frac{l_0\alpha'_0}{\sqrt{1 + T_0^2}}; \quad y'_N = \frac{S_b}{1 + C_b} + \frac{l'_0}{\sqrt{1 + T_0^2}} + \frac{l_0\alpha'_0T_0}{\sqrt{1 + T_0^2}},$$

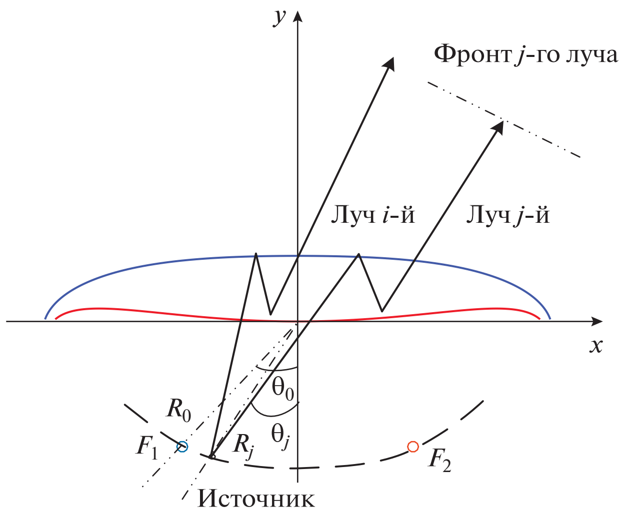

Рис. 3. Геометрия лучей в двухзеркальной системе.

$y_0 = y_1(x_0)$, $y_0' = y_1'(x_0)$; $y_0'' = y_1''(x_0)$ – значения функции $y_1(x)$, ее первой и второй производной соответственно в точке B с координатами (x_0, y_0).

2. СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ БИФОКАЛЬНЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Задача синтеза и оптимизации состоит в нахождении формы зеркал и фокальной кривой, обеспечивающие минимальную величину СКА эйконала на выходе двухзеркальной системы, которую будем определять по формуле

$$\sigma = \frac{1}{D}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(L_i - L_0)^2}, \tag{17}$$

где L_i – эйконал луча с номером i; n – количество учтенных лучей, D – размер апертуры системы; L_0 – эйконал луча, относительно которого СКА имеет минимальное значение (этот луч будем называть опорным).

Зададим исходные параметры системы: расстояние между зеркалами b, полуразмер начального отрезка x_0, расстояние f от конца начального отрезка до фокуса F_1, расстояние p от первого зеркала до фокуса F_0 начальной системы, и используем изложенный выше алгоритм синтеза бифокальной системы с начальным отрезком первого зеркала в виде полинома второго порядка $y(x) = ax^2 + b$ и четвертого $y(x) = a_4x^4 + a_2x^2 + b$. Один из коэффициентов полинома находим из условия непрерывности второй производной функций, описывающих форму зеркал (16). В первом случае, подставляя $y_0 = ax_0^2 + b; y_0' = 2ax_0; y_0'' = 2a$ в уравнение (16), находим a. Во втором случае аналогично находим a_4 при заданном значении a_2, которое в данном случае является дополнительной степенью свободы для оптимизации. Реализуя описанный выше алгоритм синтезирования отрезков зеркал m раз, находим форму зеркал, которые состоят из $2m + 1$ отрезков.

Проведем анализ СКА двухзеркальной системы, синтезированной для фиксированного значения угла зрения в зависимости от ее параметров. Для вычисления СКА системы по формуле (17) необходимо найти эйконалы лучей, для определения которых, в свою очередь, необходимо знать направление фронта и величину эйконала L_0 опорного луча, относительно которого будет рассчитываться СКА. Если источник находится в фокусе, углы выхода всех лучей из системы одинаковы и определяются формулой (7). При смещенном положении источника углы выхода лучей будут разные. Найдем k таких лучей и выберем из них несколько опорных, проходящих вблизи центра двухзеркальной системы. По формуле (17) найдем СКА для каждого опорного луча с соответствующим (ортогональным) фронтом (рис. 3) и выберем из полученных величин СКА минимальное значение. Полученное приближенное значение СКА уточняем, меняя угол выхода опорного луча и находя минимум СКА.

Для определения фокальной кривой найдем геометрическое место положений источника (см. рис. 3), которые обеспечивают наименьшую величину СКА. Декартовые и полярные координаты источника связаны формулами $x_{Fj} = -R_j\sin(\theta_j)$, $y_{Fj} = -R_j\cos(\theta_j)$. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальную функцию $R_j(\theta_j)$. Для 20 значений угла θ_j находим R_j с использованием стандартной численной процедуры нахождения минимума. Применяя сплайн-итерполяцию, находим функцию $R_j(\theta_j)$ и таким образом получаем фокальную кривую.

Проведем исследование зависимости величины СКА от параметров бифокальной системы. На рис. 4 представлены зависимости СКА от угла зрения системы с разным размером начального участка $2x_0$ в виде параболы, разными расстояниями между зеркалами b_1 и разным числом синтезированных отрезков m. Видно, что СКА медленно уменьшается при увеличении x_0. Это объясняется тем, что только система из начальных участков имеет фокус в точке $F(0, -f_0)$ на оси x. Новые синтезированные участки уже не обеспечивают точную фокусировку при положении источника в этой точке, их число при заданной апертуре системы увеличивается при уменьшении x_0 и это, соответственно, приводит к увеличению СКА.

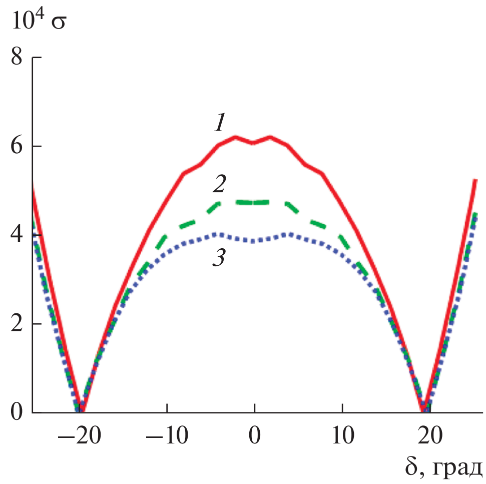

Рис. 4. Зависимость СКА бифокальной двухзеркальной системы с начальным участком первого зеркала в виде параболы в зависимости от угла зрения при $f = 0.6$, $p = 0.7$ и разных значениях x_0 и b_1: кривая *1* – $x_0 = 0.026$, $b_1 = 0.146$; кривая *2* – $x_0 = 0.0455$, $b_1 = 0.2495$, кривая *3* – $x_0 = 0.065$, $b_1 = 0.355$.

При увеличении числа синтезированных отрезков зеркал их края приближаются друг к другу. В результате зеркала либо пересекаются (рис. 5а), либо у них появляются точки возврата (рис. 5б). Параметры системы, при которых у зеркала при построении первого нового участка возникают точки возврата или решение задачи синтеза перестает существовать, будем называть критическими.

Далее исследуем СКА бифокальной системы в зависимости от параметров f и $p = f_0 + b$ для трех наборов фиксированных параметров: расстояния b между зеркалами и x_0 (отношение b/x_0 определяет угол зрения). Линии уровня СКА для трех наборов фиксированных параметров, соответствующих значениям угла зрения 50, 70 и 105 град в зависимости от параметров f и p, показаны на рис. 6а–6в. На рисунках видны границы областей существования решения, а также уменьшение величины СКА по мере приближения параметров системы к этим границам. При этом линии уровней СКА идут почти параллельно границе.

На рис. 7 представлены зависимости СКА от параметра p системы при движении вдоль границы (при критической величине f) для тех же трех наборов фиксированных параметров. Из рисунка видно, что зависимость СКА от p имеет колебательный характер, при этом для больших углов зрения средняя величина СКА при уменьшении p уменьшается. Минимальные величины СКА для исследованного интервала ($p < 2.5$) и углов зрения 50, 70 и 105 град равны 8.0×10^{-6}, 2.2×10^{-5} и 4.1×10^{-5} соответственно.

На рис. 8 приведены зависимости СКА бифокальной двухзеркальной системы от угла зрения для трех оптимальных наборов параметров, которые соответствуют трем углам зрения 50, 70 и 105 град. Как видно из рисунка, при увеличении угла зрения примерно в два раза СКА увеличивается в пять раз. При этом полученные в результате минимальные величины СКА в 60 раз меньше СКА двухзеркальных бифокальных систем, синтезированных в работе [13], и близки к СКА трехфокальных систем [14, 15].

Велчина апертуры D для разных наборов параметров получается разной. Для анализа полученных результатов удобно считать все величины относительно апертуры системы. Для этого достаточно умножить все геометрические размеры на множитель, равный обратной величине D. В результате для систем с $D = 1$ и углами зрения 50, 70

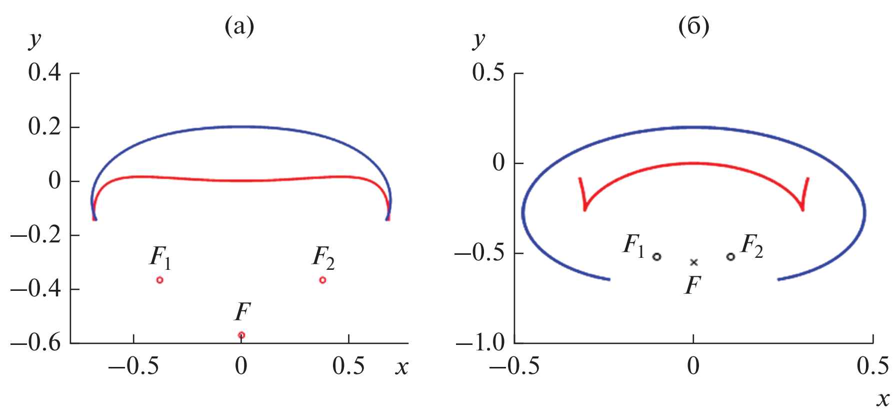

Рис. 5. Геометрия бифокальной двухзеркальной системы с параметрами $n = 1.6$, $b_1 = 0.2$, а) $x_0 = 0.006$, $f = 0.65$, $p = 0.77$; б) $x_0 = 0.035$, $f = 0.72$, $p = 0.7479$.

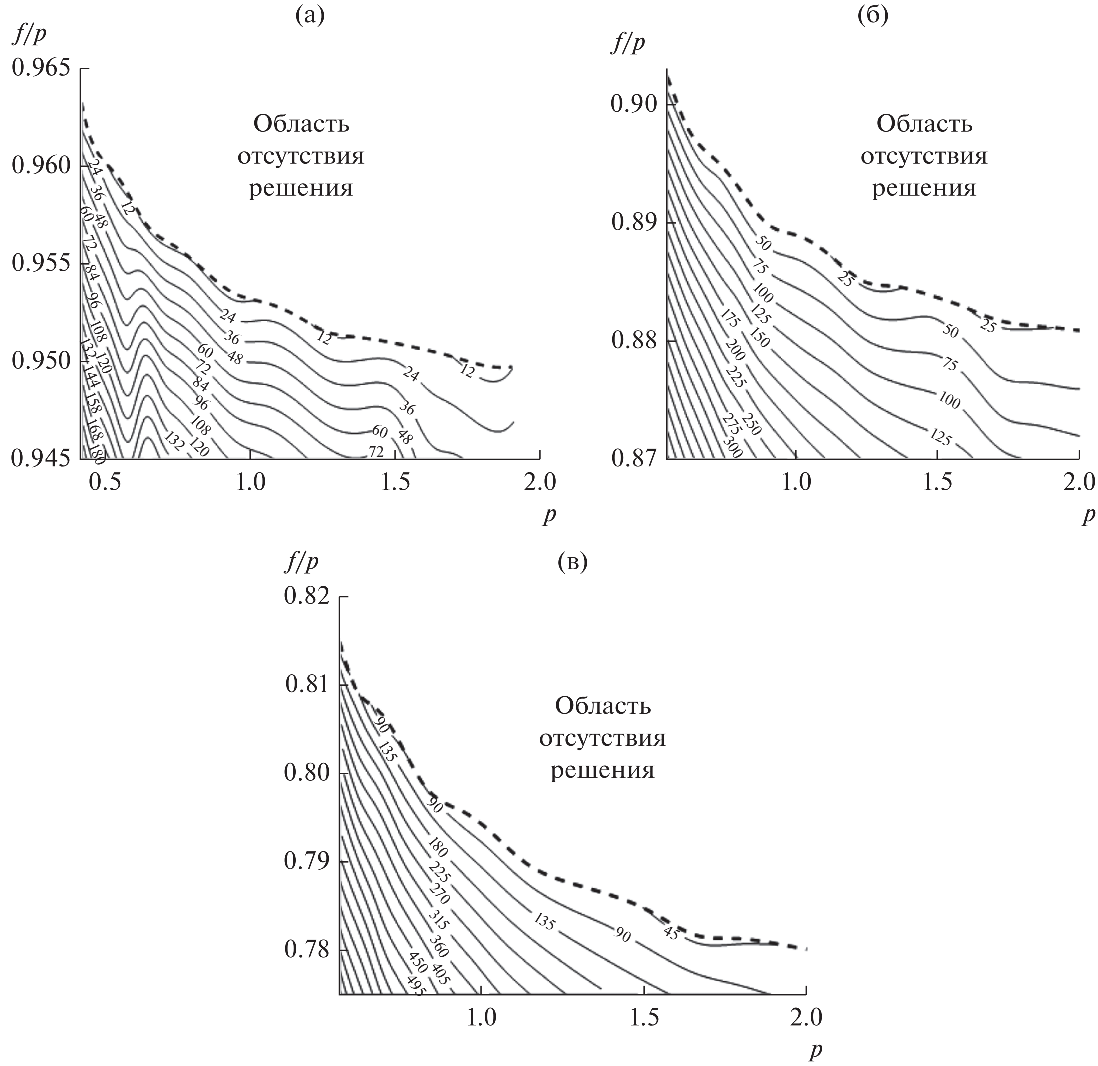

Рис. 6. Линии уровня $10^6\sigma$ бифокальной зеркальной системы в зависимости от параметров p и f/p при $b = 0.1$ и разных углов зрения: а – угол зрения 50 град ($x_0 = 0.0175$, б – угол зрения 70 град ($x_0 = 0.028$), в – угол зрения 105° ($x_0 = 0.042$).

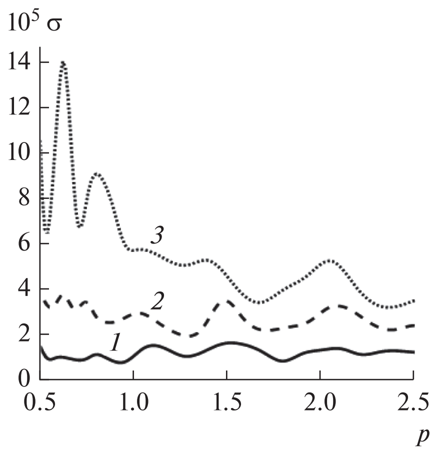

Рис. 7. Зависимости СКА бифокальной зеркальной системы для критических значений f от параметра p при $b = 0.1$: кривая *1* – угол зрения 50 град ($x_0 =$ $= 0.0175$), кривая *2* – угол зрения 70 град ($x_0 = 0.028$), кривая *3* – угол зрения 105 град ($x_0 = 0.042$).

и 105 град величина p равна 1.30, 1.14 и 1.41, а расстояние между зеркалами b равно соответственно 0.073, 0.089 и 0.061.

На рис. 9 показаны фокальные кривые синтезированных систем с оптимальными параметрами для углов зрения 50, 70 и 105 град. Видно, что с увеличением угла зрения в два раза угловой размер фокальной кривой увеличивается также в два раза, при этом фокальный размер меняется немонотонно, а различие между минимальным и максимальным размерами составляет 23%.

Дальнейшее исследование показало, что использование дополнительной степени свободы при задании формы первого участка вспомогательного зеркала в виде полинома четвертого порядка не приводит к дополнительному уменьшению СКА.

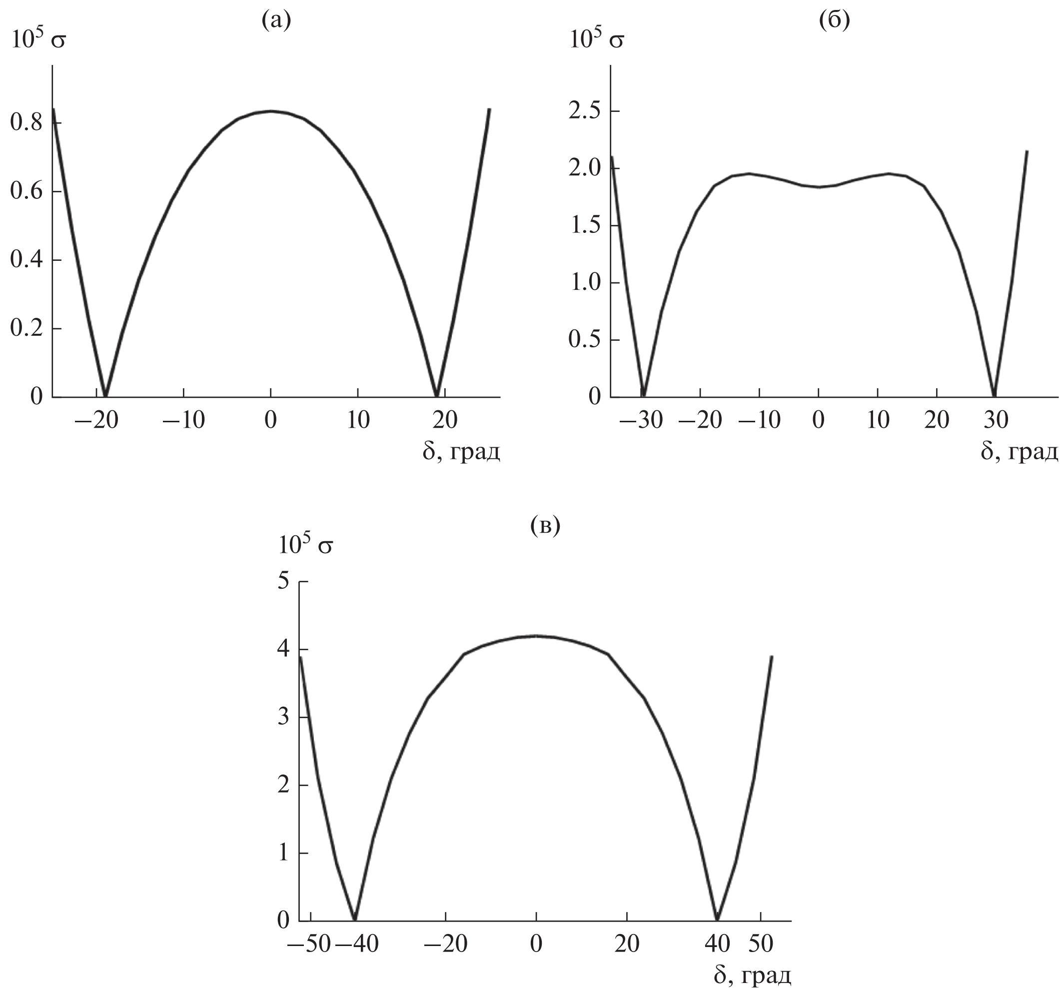

Рис. 8. Зависимость СКА оптимальной бифокальной двухзеркальной системы от угла зрения: а – $x_0 = 0.0175$, $f = 1.695$, $p = 1.784$; б – $x_0 = 0.028$, $f = 1.139$, $p = 1.287$; в – $x_0 = 0.042$, $f = 1.793$, $p = 2.306$.

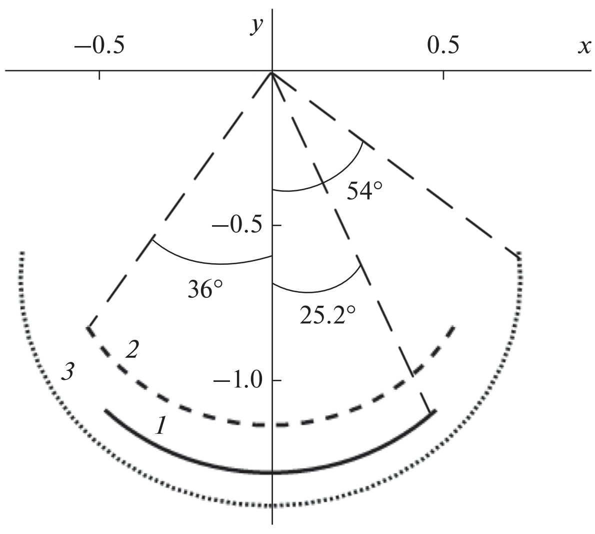

Рис. 9. Фокальные кривые синтезированных двухзеркальных систем: кривая *1* – угол зрения 50 град (x_0 = = 0.0175), кривая *2* – угол зрения 70 град ($x_0 = 0.028$), кривая *3* – угол зрения 105 град ($x_0 = 0.042$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная методика позволяет синтезировать и оптимизировать двухзеркальные бифокальные цилиндрические системы по минимуму СКА.

2. Синтезированные и оптимизированные в результате разработанной методики бифокальные двухзеркальные системы имеют СКА в десятки раз меньшие, чем известные.

3. Увеличение угла зрения в два раза приводит к увеличению СКА в пять раз, при этом различие между минимальным и максимальным продольным размером составляет 23%.

4. Задание формы начального участка вспомогательного зеркала в виде полинома четвертого порядка вместо полинома второго порядка и использование дополнительной степени свободы

не приводит к дополнительному уменьшению СКА.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеблин В.И.* // Волны и дифракция. М., 1981. С. 101.
2. *Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеблин В.И.* // РЭ. 1983. Т. 23. № 8. С. 1509.
3. *Rappaport C.M.* // IEEE Trans. 1984. V. AP-32. № 11. С. 1196.
4. *Вааз И.Л., Кинбер Б.Е.* // РЭ. 1986. Т. 31. № 8. С. 1507.
5. *Классен В.И., Кинбер Б.Е., Шишлов А.В., Тоболев А.К.* // Антенны. 1987. № 34. С. 324.
6. *Бодулинский В.К.* // Компьютерная оптика. 1987. № 1. С. 79.
7. *Craig W.P., Rappaport C.M., Jeffrey S.M.* // IEEE Trans. 1993. V. AP-41. № 11. P. 1481.
8. *Shishlov A.V., Shitikov A.M.* // Proc. 27 Sci. Conf. on Antenna Theory and Technology. Moscow. 1994. P. 227.
9. *Pino A.G., Rappaport C.M., Rubinos J.O., Lorenzo M.E.* // IEEE Trans. 1995. V. AP-43. № 10. P. 1022.
10. *Lorenzo M.E., Rappaport C.M., Pino A.G.* // Proc. IEEE APS Intern. Symp. 2001. V. 2. P. 284.
11. *Pino A.G., Llombart N., Gonzalez V.B., Rubino L.O.* // IEEE Trans. 2012. V. AP-60. № 9. P. 4119.
12. *Plastikov A.N.* // IEEE Trans. 2016. V. AP-64. № 7. P. 3251.
13. *КалошинВ.А., Ле Д.Т.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 9. http://jre.cplire.ru/jre/sep18/13/text.pdf.
14. *Калошин В.А., Нгием Х.Д., Фролова Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 1. http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf.
15. *Калошин В.А., Ле Д.Т.* // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 4. http://jre.cplire.ru/jre/apr20/4/text.pdf.