

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

ПЛАНАРНАЯ ТРЕХФОКАЛЬНАЯ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВАЯ
ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА© 2021 г. В. А. Калошин^а*, Д. Т. Ле^б^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125007 Российская Федерация^бМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

*E-mail: vak@cplire.ru

Поступила в редакцию 25.10.2019 г.

После доработки 21.05.2021 г.

Принята к публикации 25.05.2021 г.

Предложена и исследована планарная трехфокальная волноводно-щелевая антенная решетка, содержащая два слоя, первый из которых представляет собой планарный волновод с диэлектрической линзой, а второй – решетку заполненных диэлектриком прямоугольных металлических волноводов со щелями на широких стенках. Слои связаны между собой криволинейной щелью в общей стенке и с одной из сторон замкнуты криволинейным зеркалом, примыкающим к поверхности линзы. В результате решения задачи синтеза найдены поверхности линзы и положение щелей в прямоугольных волноводах, которые обеспечивают излучение плоской волны при трех положениях источника цилиндрической волны (облучателя) в планарном волноводе. Проведено исследование среднеквадратической аберрации антенной решетки, оптимизированной для углов зрения 40 и 80 град при перемещении облучателя по фокальной кривой и сравнение с аберрациями в бифокальной и трехфокальной решетках с зеркальными фокусирующими системами.

DOI: 10.31857/S0033849421110048

ВВЕДЕНИЕ

Планарные многолучевые волноводно-щелевые антенные решетки (АР) с квазиоптическим формированием лучей рассматривались в ряде работ [1–7]. В простейшем случае конструкция АР содержит два слоя, которые связаны между собой параболической щелью или системой отверстий и замкнуты параболическим зеркалом [2, 3]. В первом слое расположены один или несколько облучателей. Из-за аберраций при сдвиге облучателя из фокуса параболического зеркала параболы такая АР не может обеспечить широкоугольную многолучевую диаграмму направленности. Для уменьшения аберраций в работе [1] в качестве диаграммо-образующей системы (ДОС) решетки использована бифокальная волноводная зеркально-линзовая система, в работах [4–7] – трехфокальная система на основе микрополосковой линзы Ротмана. В работах [8–10] синтезирована и оптимизирована, а в работе [11] – экспериментально исследована двухзеркальная апланатическая ДОС, в работе [12] – синтезирована и исследована двухзеркальная бифокальная ДОС, в работе [13] – трехзеркальная апланатическая ДОС, в работе [14] – трехфокальная волноводная зеркально-линзовая ДОС с одинаковыми длинами волноводов, а в работе [15] – линзовая бифокальная

ДОС. В работе [16] предложена и исследована планарная волноводно-щелевая антенная решетка с трехслойной трехфокальной двухзеркальной ДОС. Следует отметить, что применение линзовых и зеркально-линзовых ДОС с принудительным преломлением и увеличение числа слоев до трех в АР с двухзеркальной ДОС приводит к усложнению конструкции и увеличению потерь.

В работе [17] предложена и исследована бифокальная волноводно-щелевая антенная решетка на основе простой двухслойной конструкции с эллиптическим зеркалом и показана возможность формирования многолучевой диаграммы в угле зрения 80 град. Дальнейшее расширение угла зрения и увеличение числа лучей ограничиваются аберрациями бифокальной системы. В работе [18] синтезирована и оптимизирована двухслойная апланатическая зеркально-линзовая ДОС.

В данной работе решается задача синтеза и анализа аберраций планарной волноводно-щелевой антенной решетки с трехфокальной двухслойной зеркально-линзовой ДОС.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Синтезируемая АР (рис. 1) состоит из двух слоев: первого – в виде планарного волновода l с диэлектрической линзой 2 и расположенными на

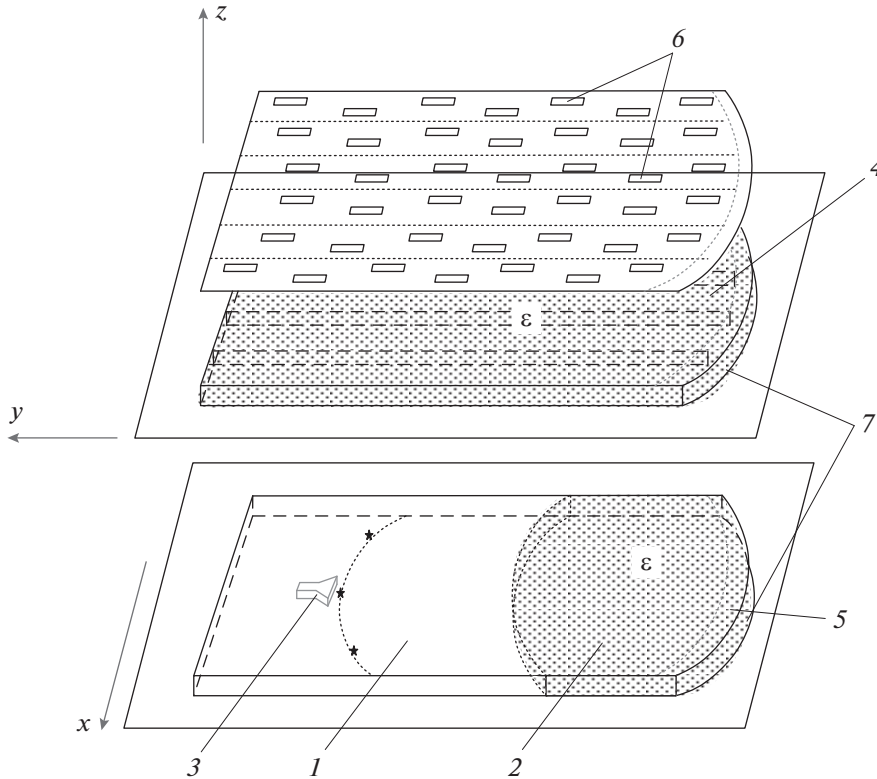


Рис. 1. Конструкция трехфокальной зеркально-линзовой планарной волноводно-щелевой антенной решетки: 1 – планарный волновод, 2 – диэлектрическая линза, 3 – облучатели, 4 – прямоугольный волновод, 5 – щель связи, 6 – продольные щели, 7 – зеркала.

фокальной линии облучателями 3, и второго – в виде решетки заполненных диэлектриком прямоугольных волноводов 4, которые возбуждаются через криволинейную щель связи 5 между первым и вторым этажами. Щель связи 5 находится на краях планарных волноводов, которые замыкаются конфокальным щелям зеркалом. В широкой стенке каждого прямоугольного волновода 4 периодически расположены парные продольные щели 6.

Цилиндрическая волна, излученная облучающим рупором в первом слое, распространяется по планарному волноводу 1, преломляется линзой 2, отражается от зеркала 7 и через щель связи 5 возбуждает решетку прямоугольных волноводов 4. В каждом из прямоугольных волноводов возбуждается основная мода H_{10} , которая, распространяясь вдоль волновода, излучает энергию через щели в его широкой стенке, в результате чего при условии синфазного излучения всех щелей антенной решетки формируется узкий луч с высоким усилением. При перемещении облучателя

вдоль фокальной кривой изменяются фазовые соотношения между модами прямоугольных волноводов и в результате осуществляется сканирование луча антенны. При расположении на фокальной кривой нескольких облучателей реализуется многолучевой режим излучения АР.

Задача синтеза АР заключается в определении входной поверхности линзы, формы зеркала (щелей связи) и расположения щелей в волноводах, которые обеспечивают излучение плоской волны в трех направлениях при расположении облучателя в каждом из трех фокусов.

Потребуем, чтобы после излучения цилиндрической волны из источника, расположенного в фокусе F_1 , F_2 или F , преломления линзой, отражения от зеркала, прохождения через волноводы и излучения через щели эйконалы лучей до плоскости фронта излученной волны с нормалью, расположенной под углом β к плоскости решетки, совпадали, т.е. удовлетворяли условиям:

$$F_1A + nAB + nt_B + (x_N - x_B) \sin \alpha + |z_N - z_B| \cos \beta - |t_N - t_B| \cos \beta = F_1P + nPN + nt_N, \quad (1)$$

$$F_2M + nMQ + nt_Q + (x_Q - x_D) \sin \alpha + |z_D - z_Q| \cos \beta - |t_D - t_Q| \cos \beta = F_2C + nCD + nt_D, \quad (2)$$

$$FP + nPQ + nt_Q - |t_B - t_Q| \cos \beta = FC + nCB + nt_B, \quad (3)$$

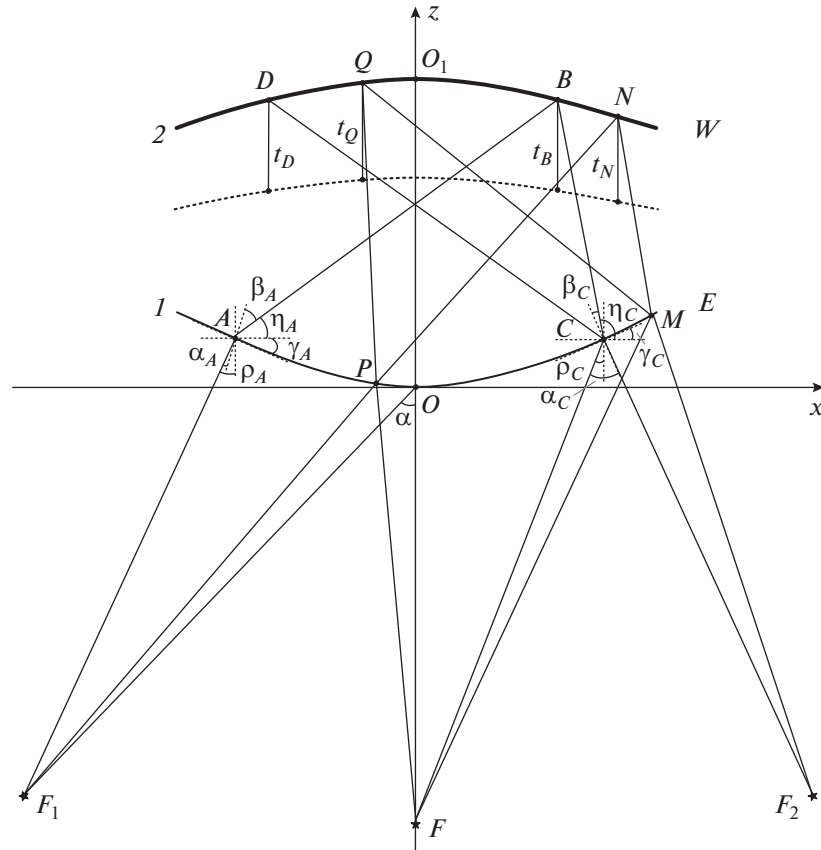


Рис. 2. К синтезу трехфокальной зеркально-линзовой планарной волноводно-щелевой антенной решетки: 1 – поверхность линзы, 2 – поверхность зеркала.

где

$$\begin{aligned}
 FP &= \sqrt{(x_F - x_P)^2 + (z_F - z_P)^2}; \\
 FC &= \sqrt{(x_F - x_C)^2 + (z_F - z_C)^2}; \\
 PQ &= \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}; \\
 CB &= \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (z_C - z_B)^2}; \\
 F_2C &= \sqrt{(x_{F_2} - x_C)^2 + (z_{F_2} - z_C)^2}; \\
 CD &= \sqrt{(x_C - x_D)^2 + (z_C - z_D)^2}; \\
 F_2M &= \sqrt{(x_{F_2} - x_M)^2 + (z_{F_2} - z_M)^2}; \\
 MQ &= \sqrt{(x_M - x_Q)^2 + (z_M - z_Q)^2}; \\
 F_1A &= \sqrt{(x_A - x_{F_1})^2 + (z_A - z_{F_1})^2}; \\
 AB &= \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (z_A - z_B)^2}; \\
 F_1P &= \sqrt{(x_P - x_{F_1})^2 + (z_P - z_{F_1})^2}; \\
 PN &= \sqrt{(x_N - x_P)^2 + (z_N - z_P)^2};
 \end{aligned}$$

n – коэффициент преломления; α – угол между осью z и лучом F_1O ; t, t_B, t_D, t_N – расстояния от соответствующих точек до линии размещения цен-

тров щелей, β – угол излучения -1 пространственной гармоники вытекающей волны относительно оси волновода (Oz), $\cos \beta = \frac{\gamma p - 2\pi}{kp}$, γ – постоянная распространения вытекающей волноводной моды; p – период размещения щелей вдоль волновода (оси Oz); k – волновое число в свободном пространстве (остальные обозначения понятны из рис. 2).

Таким образом, задача синтеза решетки сводится к определению функций $z_1(x)$, $z_2(x)$ и $t(x)$, удовлетворяющих системе уравнений (1)–(3).

2. СИНТЕЗ ПЛАНАРНОЙ ТРЕХФОКАЛЬНОЙ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Предположим, что луч цилиндрической волны из первой точки идеальной фокусировки (первого фокуса) F_1 (см. рис. 2) преломляется линзой в точке $A(x_A, z_A)$ и падает на зеркало в точке $B(x_B, z_B)$. А луч цилиндрической волны из второго фокуса F преломляется линзой в точке $C(x_C, z_C)$ и тоже падает на зеркало в точке $B(x_B, z_B)$. Зададим

профиль входной поверхности линзы AC в виде параболической функции: $z_1(x) = a_2x^2$, зеркала BD – в виде параболической функции: $z_2(x) = b_2x^2 + b_0$, положения точек $F_1(x_{F1}, z_{F1})$, $F(x_F, z_F)$, $F_2(x_{F2}, z_{F2})$, $O_1(x_{O1}, z_{O1})$, x_A , угол между осью x и касательной прямой линзы в точке A – γ_A и расстояние от точки B до линии размещения центров щелей t_B .

Из геометрии на рис. 2 следует: угол $\alpha = \arctg(x_{F1}/z_{F1})$; $a_2 = \tg \gamma_A / (2x_A)$; $y_A = a_2x_A^2$; угол между осью z и падающим лучом F_1A в точке A равен $\rho_A = \arctg((x_A - x_{F1})/(z_A - z_{F1}))$; угол падения из фокуса F_1 в точке A – $\alpha_A = \rho_A + \gamma_A$; угол преломления из фокуса F_1 в точке A – $\beta_A = \arcsin(\sin \alpha_A/n)$; угол между осью x и лучом AB в точке A – $\eta_A = 90^\circ + \gamma_A - \beta_A$; $x_A = -x_C$; $z_A = z_C$; угол между осью z и падающим лучом FC в точке C – $\rho_C = \arctg((x_C - x_F)/(z_C - z_F))$; угол падения из фокуса F в точке C – $\alpha_C = \rho_C + \gamma_C$; угол преломления из фокуса F в точке C – $\beta_C = \arcsin(\sin \alpha_C/n)$; угол между осью x и лучом CD в точке C – $\eta_C = 90^\circ + \gamma_C - \beta_C$;

$$\begin{aligned} b_0 &= y_{O1}; \quad b_2 = (z_B - b_0)/x_B^2; \\ x_B &= (z_C - x_C \tg \eta_C - z_A + x_A \tg \eta_A) / (\tg \eta_A - \tg \eta_C); \\ z_B &= x_B \tg \eta_A + z_A - x_A \tg \eta_A; \quad x_D = -x_B; \quad z_D = z_B. \end{aligned}$$

Предположим, что луч из фокуса F преломляется линзой в некоторой точке P в интервале AC и падает на зеркало в точке Q в интервале BD . Тогда

$$t_Q = (FC + nCD + nt_B - FP - nPQ + |t_B - t_Q| \cos \beta) / n. \tag{6}$$

Для определения нового участка линзы предположим, что луч из фокуса F_2 , падающий на линзу и преломляющийся от нее в некоторой точке M в интервале CE , попадет в точку Q в зеркале. Предположим, что $F_2M = u$ и $MQ = v$, где

$$\begin{aligned} F_2M &= \sqrt{(x_M - x_{F2})^2 - (z_M - z_{F2})^2}, \\ MQ &= \sqrt{(x_M - x_Q)^2 - (z_M - z_Q)^2}. \end{aligned} \tag{7}$$

Из уравнения (2) следует:

$$\begin{aligned} F_2C + nCD + nt_D &= \\ = u + nv + nt_Q + (x_Q - x_D) \sin \alpha + \\ + |z_D - z_Q| \cos \beta - |t_D - t_Q| \cos \beta. \end{aligned} \tag{8}$$

Отсюда получаем

$$\begin{aligned} F_2C + nCD + nt_D - nt_Q - (x_Q - x_D) \sin \alpha - \\ - |z_D - z_Q| \cos \beta + |t_D - t_Q| \cos \beta - nv - u = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Из уравнений (7) и (9) получаем

угол между осью z и падающим лучом в точке P есть

$$\rho_P = \arctg((x_P - x_F)/(z_P - z_F)),$$

где $z_P = z_1(x_P)$;

угол между осью x и касательной прямой линзы в точке P –

$$\gamma_P = \arctg(z_1'(x_P));$$

угол падения из фокуса F в точке P –

$$\alpha_P = \rho_P + \gamma_P;$$

угол преломления из фокуса F в точке P –

$$\beta_P = \arcsin(\sin \alpha_P/n);$$

угол между осью x и лучом PQ в точке P –

$$\eta_P = 90^\circ + \gamma_P - \beta_P.$$

Из геометрии на рис. 2 получим систему уравнений

$$\begin{cases} z_Q = x_Q \tg \eta_P + z_P - x_P \tg \eta_P, \\ z_Q = b_2x_Q^2 + b_0. \end{cases} \tag{4}$$

Решение системы уравнений (4) имеет вид

$$\begin{cases} x_Q = \frac{\tg \eta_P \pm \sqrt{\tg^2 \eta_P - 4b_2b_0 + 4b_2z_P - 4b_2x_P \tg \eta_P}}{2b_2}, \\ z_Q = b_2x_Q^2 + b_0. \end{cases} \tag{5}$$

Знак перед корнем выбирается так, чтобы значение x_Q было положительным числом.

Из уравнения (3) получаем

$$z_M = \frac{B - x_M(2x_{F2} - 2x_Q)}{2z_{F2} - 2z_Q}, \tag{10}$$

$$x_M = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1}, \tag{11}$$

где

$$B = v^2 - u^2 + x_{F2}^2 + z_{F2}^2 - x_Q^2 - z_Q^2;$$

$$A_1 = 1 + \frac{(2x_{F2} - 2x_Q)^2}{(2z_{F2} - 2z_Q)^2};$$

$$A_2 = \frac{2(2x_{F2} - 2x_Q)z_{F2}}{2z_{F2} - 2z_Q} - \frac{2B(2x_{F2} - 2x_Q)}{(2z_{F2} - 2z_Q)^2} - 2x_{F2};$$

$$A_3 = \frac{B^2}{(2z_{F2} - 2z_Q)^2} - \frac{2Bz_{F2}}{2z_{F2} - 2z_Q} - u^2 + x_{F2}^2 + z_{F2}^2,$$

а знак перед корнем в (11) выбирается так, чтобы значение z_M было положительным. Отсюда имеем

$$\rho_M = \arctg((x_M - x_{F2})/(z_M - z_{F2}))$$

– угол между осью z и лучом F_2M .

Из геометрии на рис. 2 следует, что угол между осью x и касательной прямой линзы в точке M имеет вид

$$\gamma_M = \arctg\left(\frac{n \sin A_4 - \sin \rho_M}{\cos \rho_M - n \cos A_4}\right), \quad (12)$$

где $A_4 = \arctg\left(\frac{z_Q - z_M}{x_M - x_Q}\right) - 90^\circ$.

Для определения нового участка зеркала предположим, что луч из фокуса F_1 , падающий на линзу и преломляющийся в некоторой точке P в интервале AC , попадет в точку N в интервале BW зеркала. При этом луч из фокуса F , преломленный линзой в точке M , тоже попадет в точку N в интервале BW зеркала.

Отсюда имеем: угол между осью z и падающим лучом F_1P в точке P

$$\rho_{PF_1} = \arctg((x_P - x_{F_1}) / (z_P - z_{F_1}));$$

угол падения из фокуса F_1 в точке P –

$$\alpha_{PF_1} = \rho_{PF_1} + \gamma_P;$$

угол преломления из фокуса F_1 в точке P –

$$\beta_{PF_1} = \arcsin(\sin \alpha_{PF_1} / n);$$

угол между осью x и лучом PN в точке P –

$$\eta_{PN} = 90^\circ + \gamma_P - \beta_{PF_1};$$

угол между осью z и падающим лучом FM в точке M –

$$\rho_{FM} = \arctg((x_M - x_F) / (z_M - z_F));$$

угол падения луча из фокуса F в точке M –

$$\alpha_{FM} = \rho_{FM} + \gamma_M;$$

угол преломления луча из фокуса F в точке M –

$$\beta_{FM} = \arcsin(\sin \alpha_{FM} / n);$$

угол между осью x и лучом MN в точке M –

$$\eta_{MN} = 90^\circ + \gamma_M - \beta_{FM}.$$

Из геометрии на рис. 2 находим координаты точки N :

$$x_N = \frac{z_P - x_P \operatorname{tg} \eta_{PN} - z_M + x_M \operatorname{tg} \eta_{MN}}{\operatorname{tg} \eta_{MN} - \operatorname{tg} \eta_{PN}}; \quad (13)$$

$$z_N = x_N \operatorname{tg} \eta_{PN} + z_P - x_P \operatorname{tg} \eta_{PN}. \quad (14)$$

Из уравнения (1) для всех лучей, выходящих из фокуса F_1 , преломленных линзой в интервале AC и отраженных от зеркала в интервале BW , до фронта, и для лучей, выходящих из фокуса F , преломленных линзой в интервале CE и отраженных от зеркала в интервале BW , следует:

$$\begin{aligned} FC + nCB + nt_B - |t_N - t_B| \cos \beta &= \\ &= FM + nMN + nt_N, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$FC = \sqrt{(x_C - x_F)^2 + (z_C - z_F)^2};$$

$$CB = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (z_B - z_C)^2};$$

$$FM = \sqrt{(x_M - x_F)^2 + (z_M - z_F)^2};$$

$$MN = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (z_M - z_N)^2}.$$

Вычитая уравнение (15) из уравнения (1), получаем

$$C - nPN + FM + nMN + (x_N - x_B) \sin \alpha = 0, \quad (16)$$

где

$$C = F_1A + nAB - F_1P + |z_M - z_B| \cos \beta.$$

Из уравнения (16) находим u , из уравнений (9), (10) и (11) находим v , x_M и z_M , из уравнения (13) и (14) находим x_N и z_N , из уравнения (15) находим t_M . При перемещении точки P в интервале AC и перемещении точки Q в интервале BD соответственно находим участок BW зеркала, участок CE линзы и расстояние t от зеркала в интервале BW до линии размещения центров щелей.

Повторяя аналогичную процедуру, получаем следующие участки линзы, зеркала и положения щелей.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ ТРЕХФОКАЛЬНОЙ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОЙ ПЛАНАРНОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Для анализа нормированной среднеквадратической абберации эйконала в апертуре трехфокальной линзово-зеркальной планарной волноводно-щелевой АР при излучении вытекающей волны по нормали к оси волновода ($\beta = 90^\circ$) синтезируем два варианта построения решетки (для углов зрения 80° и 40°). Величину СКА определим по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - L_0)^2 / N}, \quad (17)$$

где L_i – длина оптического пути луча с номером i от источника до точки фокусировки; L_0 – длина центрального луча; $N = 50$ – число учтенных лучей.

При определении положения точек $F_1(x_{F_1}, z_{F_1})$, $F(x_F, z_F)$, $F_2(x_{F_2}, z_{F_2})$, $O_1(x_{O_1}, z_{O_1})$, x_A угол между осью x и касательной прямой линзы в точке A – γ_A и расстояние от точки B до линии размещения центров щелей t_B оптимизируются так, чтобы величина СКА в заданных углах зрения была наименьшей. В результате оптимизации получаем следующие величины параметров:

а) для угла зрения 40° : $x_{F_1} = -0.1$; $z_{F_1} = -0.4$; $x_F = 0$; $z_F = -0.5$; $x_{F_2} = 0.1$; $z_{F_2} = -0.4$; $x_A = -0.09$; $\gamma_A = -0.01$; $t_B = 0.25$.

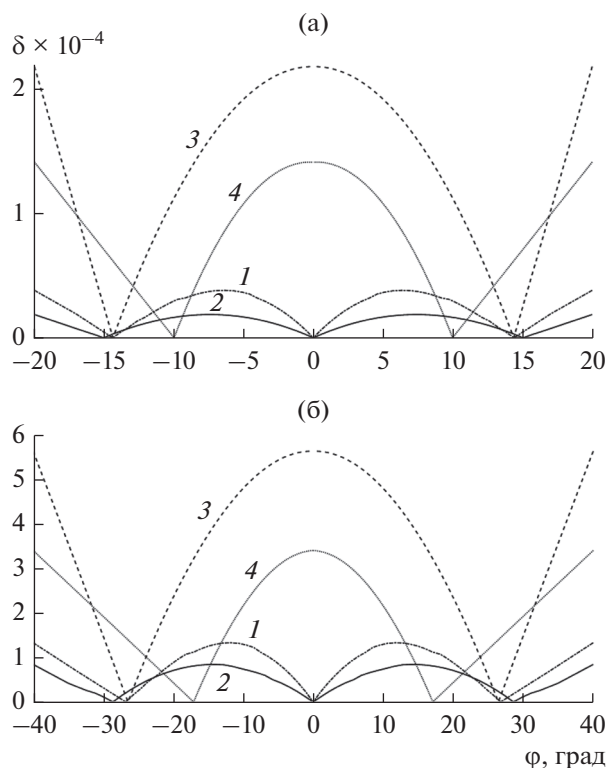


Рис. 3. Зависимость величины СКА от угла зрения: синтез для угла зрения 40° (а) и синтез для угла зрения 80° (б): 1 – трехфокальная зеркально-линзовая двухслойная волноводно-щелевая АР, 2 – трехфокальная трехслойная двухзеркальная АР, 3 – бифокальная двухслойная однозеркальная антенная решетка, 4 – бифокальная трехэтажная двухзеркальная АР.

б) для угла зрения 80° : $x_{F1} = -0.25$; $z_{F1} = -0.45$; $x_F = 0$; $z_F = -0.5$; $x_{F2} = 0.25$; $z_{F2} = -0.45$; $x_A = -0.09$; $\gamma_A = -0.09$; $t_B = 0.25$.

На рис. 3а, 3б показаны зависимости величины СКА от угла зрения соответственно для первого и второго вариантов синтезированной трехфокальной зеркально-линзовой планарной волноводно-щелевой АР. Также приведены аналогичные зависимости бифокальной трехслойной двухзеркальной АР с прямолинейными линиями расположения щелей [12], бифокальной двухслойной однозеркальной АР [16] и трехфокальной трехслойной двухзеркальной волноводно-щелевой АР [17].

Как видно на рис. 3, с увеличением угла зрения в два раза СКА трехфокальной зеркально-линзовой и двухзеркальной планарной волноводно-щелевых АР увеличивается в три раза, а бифокальных – в два-три раза. При этом в угле зрения 40° СКА трехфокальной зеркально-линзовой волноводно-щелевой АР (0.4×10^{-4}) в два раза больше, чем трехфокальной трехслойной двухзеркальной антенной решетки (0.2×10^{-4}), в 5.5 раз меньше, чем бифокальной двухслойной однозеркальной (2.2×10^{-4})

и в 3.5 раза меньше, чем бифокальной трехслойной двухзеркальной антенной решетки (1.4×10^{-4}). В угле зрения 80° значение СКА трехфокальной зеркально-линзовой волноводно-щелевой АР (1.2×10^{-4}) в 1.5 раза больше, чем трехфокальной трехслойной двухзеркальной АР (0.8×10^{-4}), в 4.7 раз меньше, чем бифокальной двухслойной однозеркальной (5.6×10^{-4}), и в 2.8 раза меньше, чем бифокальной трехслойной двухзеркальной АР (3.4×10^{-4}).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Величина среднеквадратической aberrации трехфокальной зеркально-линзовой двухслойной волноводно-щелевой антенной решетки в три-пять раз меньше, чем у решеток с бифокальной диаграммо-образующей системой.

2. Величина среднеквадратической aberrации двухслойной трехфокальной зеркально-линзовой планарной волноводно-щелевой антенной решетки в 1.5–2 раза больше, чем трехслойной трехфокальной двухзеркальной антенной решетки.

3. Разница величин среднеквадратических aberrаций разных систем уменьшается с увеличением угла зрения.

4. Расположение щелей трехфокальных решеток зависит от угла излучения волновода вытекающей волны β , т.е. от частоты. Поэтому при изменении частоты возникают дополнительные aberrации, что ограничивает полосу рабочих частот этих антенн.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калюшин В.А.* // Тр. 13-й Междунар. Крымской конф. “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Crimico-2003”, 8–12 сент. Севастополь: Вебер, 2003. С. 383.
2. *Ettorre M., Gandini E., Sauleau R.* // Proc. 5th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP). Rome. 11–15 Apr. 2011. N.Y.: IEEE, 2011. P. 2947.
3. *Банков С.Е., Грачев Г.Г., Дупленкова М.Д., Фролова Е.В.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 6. С. 552.
4. *Tekkouk K., Ettorre M., Le Coq L., Sauleau R.* // IEEE Trans. 2016. V. AP-64. № 2. P. 504.
5. *Tekkouk K., Ettorre M., Sauleau R., Casaletti M.* // Proc. 2012 IEEE Antennas and Propagation Int. Simp. Chicago. 8–12 Jul. N.Y.: IEEE, 2012. P. 2979.

6. *Toan K., Vo Dai, Tuan Nguzen, Kilic O.* // Proc. 2017 IEEE Int. Simp. Antennas and Propag. & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego. 9–14 Jul. N.Y.: IEEE, 2017. P. 2129.
7. *Yi Liu, Hu Zang, Zusheng Jin, Jiang Zhu* // IET Microw. Antennas Propag. 2018. V. 12. № 15. P. 2307.
8. *Калошин В.А., Фролова Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.html>
9. *Венецкий А.С., Калошин В.А.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 11. С. 1102.
10. *Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.А.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 11. С. 1090.
11. *Банков С.Е., Фролова Е.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 5. С. 463.
12. *Калошин В.А., Ле Д.Т.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/13/text.pdf>
13. *Венецкий А.С., Калошин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 1. <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/4/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., Нгием Х.Д.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/17/text.pdf>.
16. *Калошин В.А., Ле Д.Т.* // РЭ. 2021. Т. 66. № 10. С. 974.
17. *Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е.В.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 8. С. 768.
18. *Калошин В.А., Фролова Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec15/19/text.html>.