

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.396.67

ТРЕХФОКАЛЬНАЯ ТРЕХСЛОЙНАЯ 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 22.08.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 15.12.2019 г.

Предложена и исследована трехфокальная планарная волноводно-щелевая антенная решетка, состоящая из трех слоев, первые два из которых представляют собой планарные волноводы, а третий — решетку прямоугольных металлических волноводов с парными продольными или поперечными щелями на широких стенках. В результате решения задачи синтеза найдена форма зеркал и положения щелей в прямоугольных волноводах, которые обеспечивают излучение плоской волны при трех положениях источника цилиндрической волны (облучателя) в планарном волноводе. Проведено исследование величины среднеквадратической абберации антенной решетки, оптимизированной в угле зрения 40 и 80 град при перемещении облучателя по фокальной кривой и показано, что эта величина в 4.5...11 раз меньше, чем у трехслойной двухзеркальной и двухслойной однозеркальной бифокальных антенных решеток.

DOI: 10.31857/S0033849421100077

ВВЕДЕНИЕ

Планарные многолучевые волноводно-щелевые антенные решетки (АР) с квазиоптическим формированием лучей рассматривались в ряде работ [1–7]. В простейшем случае такая АР содержит два слоя, которые связаны между собой параболической щелью или системой отверстий и замкнуты параболическим зеркалом [2, 3]. В первом слое решетки расположены облучатели. Однако из-за фазовых аббераций при сдвиге облучателя из фокуса параболического зеркала параболы такая антенна не может обеспечить широкоугольную многолучевую диаграмму направленности. Для уменьшения аббераций в работе [1] в качестве диаграммообразующей системы (ДОС) 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 планарная ДОС, в работе [12] синтезирована и исследована двухзеркальная бифокальная ДОС, в работе [13] — трехзеркальная апланатическая ДОС, а в работе [14] — трехфокальная волноводная зеркально-линзовая планарная ДОС с одинаковыми длинами волноводов. Однако применение линзовых и зеркально-

линзовых систем с принудительным преломлением приводит к усложнению конструкции и увеличению потерь ДОС. В работе [15] предложена и исследована бифокальная волноводно-щелевая АР на основе простой двухслойной конструкции с эллиптическим зеркалом. Показана возможность формирования многолучевой диаграммы в угле зрения 80°. Дальнейшее расширение угла зрения и числа лучей ограничивается абберациями бифокальной системы.

В данной работе ставится и решается задача синтеза формы двух зеркал и положения щелей, обеспечивающих точную фокусировку при трех положениях облучателя на фокальной кривой в первом слое трехслойной волноводно-щелевой АР и оптимизации этих положений (фокусов) с целью минимизации среднеквадратической абберации (СКА) в углах зрения 80° и 40°. Также проводится анализ СКА синтезированных и оптимизированных антенн, результаты которого сопоставлены с соответствующими результатами для двухслойной однозеркальной бифокальной АР и трехслойной двухзеркальной бифокальной АР с прямыми линиями расположения щелей в соседних волноводах.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Синтезируемая АР (рис. 1) состоит из трех слоев: первого — в виде планарного волновода 1 с расположенными на фокальной линии облучателями 2, второго — в виде планарного волновода 3, связанного через криволинейные щели 5 и 6 с первым и третьим, и третьего — в виде решетки заполненных диэлектриком прямоугольных волноводов 4, которые возбуждаются через криволинейную щель связи 6 между вторым и третьим слоями. Щели связи 5 и 6 находятся на краях планарных волноводов, которые замыкаются конфокальными щелями зеркалами. В широкой стенке каждого прямоугольного волновода 4 периодически расположены парные продольные или поперечные щели 7.

Цилиндрическая волна, излученная облучающим рупором на первом этаже, распространяется по планарному волноводу 1, отражается от первого зеркала 8 и через щель связи 5 попадает в планарный волновод 3 на втором слое. Далее она распространяется по планарному волноводу 3, отражается от второго зеркала 9 и через щель связи 6 возбуждает решетку прямоугольных волноводов 4. В каждом из прямоугольных волноводов возбуждается основная мода, 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 формы зеркал (щелей связи) и расположения щелей в волноводах, которые обеспечивают излучение плоской волны в трех направлениях при расположении облучателей в трех фокусах.

Нетрудно убедиться, что эта задача эквивалентна трехмерной задаче синтеза двухмерной трехзеркальной системы, с одной стороны которой расположены два симметричных относительно оси z фокуса (точки F_1 и F_2), третий лежит на этой оси (точка F), а второе и третье зеркало соединены линиями передачи (волноводами), параллельными этой оси (рис. 2). Потребуем, чтобы после последовательного отражения от двух зеркал цилиндрической волны источника, расположенного в фокусе F_1 , F_2 или F , после прохождения через линии передачи эйконалы полей в точках пересечения этих линий с третьим зеркалом удовлетворяли соответственно условиям:

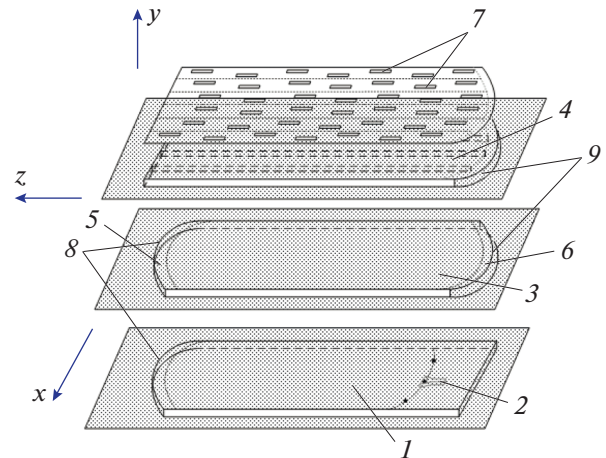


Рис. 1. Конструкция трехслойной волноводно-щелевой антенной решетки: 1 — планарный волновод первого слоя, 2 — облучатель, 3 — планарный волновод второго слоя, 4 — прямоугольный волновод третьего слоя, 5–7 — щели связи, 8, 9 — зеркала.

$$F_1C + CB + t_B + (x_M - x_B) \sin \alpha + |z_M - z_B| \cos \beta - |t_M - t_B| \cos \beta = F_1P + PM + t_M, \quad (1)$$

$$F_2D + DA + t_A = F_2N + NQ + t_Q + (x_Q - x_A) \sin \alpha + |z_A - z_Q| \cos \beta - |t_A - t_Q| \cos \beta, \quad (2)$$

$$FP + PQ + t_Q - |t_A - t_Q| \cos \beta = FD + DB + t_B, \quad (3)$$

где

$$FP = \sqrt{(x_F - x_P)^2 + (z_F - z_P)^2},$$

$$FD = \sqrt{(x_F - x_D)^2 + (z_F - z_D)^2},$$

$$PQ = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2},$$

$$DB = \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (z_D - z_B)^2},$$

$$F_2D = \sqrt{(x_{F2} - x_D)^2 + (z_{F2} - z_D)^2},$$

$$DA = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (z_D - z_A)^2},$$

$$F_2N = \sqrt{(x_{F2} - x_N)^2 + (z_{F2} - z_N)^2},$$

$$NQ = \sqrt{(x_N - x_Q)^2 + (z_N - z_Q)^2},$$

$$F_1C = \sqrt{(x_C - x_{F1})^2 + (z_C - z_{F1})^2},$$

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

$$F_1P = \sqrt{(x_P - x_{F1})^2 + (z_P - z_{F1})^2},$$

$$PM = \sqrt{(x_M - x_P)^2 + (z_M - z_P)^2},$$

α — угол между осью z и лучами F_1O_1 , F_2O_1 ; t_A , t_Q , t_B , t_M расстояния от соответствующих точек до линии размещения центров щелей, β угол излучения —1 пространственной гармоники вытекающей волны относительно оси волновода (Oz), $\cos \beta = \frac{\gamma p - 2\pi}{kp}$,

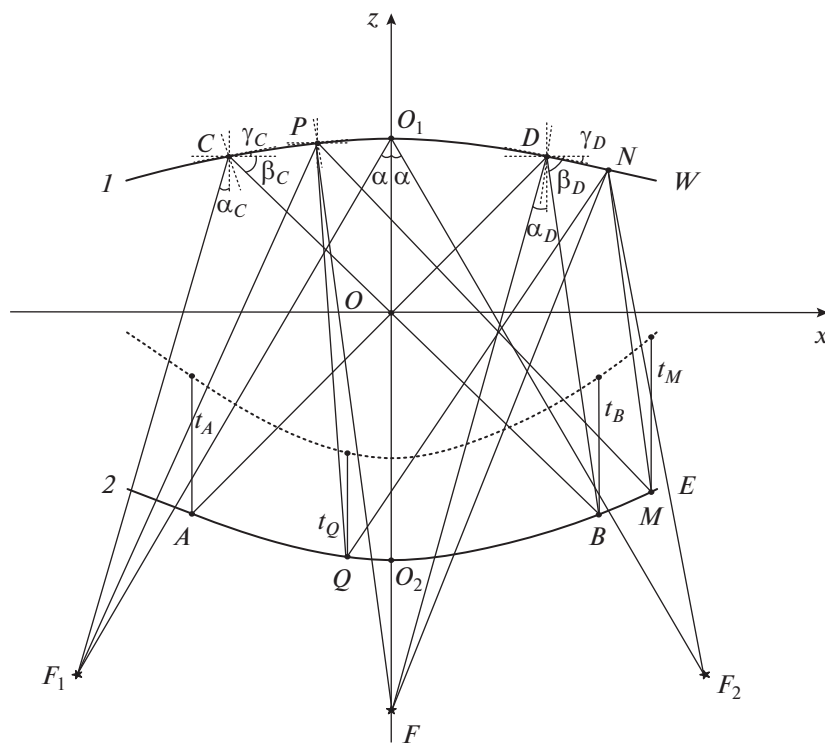


Рис. 2. К синтезу формы зеркал и положению щелей (пояснения в тексте).

постоянная распространения вытекающей волноводной моды; p — период размещения щелей вдоль волновода (оси Oz); k — постоянная распространения в свободном пространстве, остальные обозначения понятны из рис. 2.

В случае расположения щелей в точках пересечения линий с третьим зеркалом и выполнения уравнений (1)–(3) величины эйконалов лучей из фокусов в этих точках плюс расстояния этих точек до плоскости с нормалью, расположенной под углом β к линиям передачи, будут равны.

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

2. СИНТЕЗ ТРЕХФОКАЛЬНОЙ ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Предположим, что луч цилиндрической волны из первой точки идеальной фокусировки (первого фокуса) F_1 (см. рис. 2) отражается от первого зеркала в точке $C(x_C, z_C)$ и падает на второе зеркало в точке $B(x_B, z_B)$. А луч цилиндрической волны из второго фокуса F отражается от первого зеркала в точке $D(x_D, z_D)$ и тоже падает на второе зеркало в точке $B(x_B, z_B)$.

Зададим профиль центральной части первого зеркала (CD) в виде параболической функции $z_1(x) = b_2x^2 + b_0$, второго зеркала (AB) — в виде па-

раболической функции $z_2(x) = a_2x^2 + a_0$, а также определим положения точек $F_1(x_{F1}, z_{F1})$, $F(x_F, z_F)$, $F_2(x_{F2}, z_{F2})$, $C(x_C, z_C)$, $O_2(x_{O2}, z_{O2})$ и расстояние от точки B до линии размещения центров щелей t_B .

Из геометрии на рис. 2 следует:

$$\alpha = \arctg(x_{F1}/(z_{F1} - z_{O1})),$$

угол между осью z и лучом F_1C в точке C равен

$$\alpha_C = \arctg((x_C - x_{F1})/(z_C - z_{F1})),$$

угол между осью z и лучом FD в точке D —

$$\alpha_D = \arctg((x_D - x_F)/(z_D - z_F)),$$

где $x_D = -x_C$, $z_D = z_C$, $\gamma_C = (90^\circ - \alpha_C - \beta_C)/2$, $b_2 = \tg \gamma_C/(2x_C)$, $b_0 = y_C - b_2x_C^2$, $\gamma_D = -\gamma_C$, $\beta_D = \alpha_D + 2\gamma_D - 90^\circ$, $z_B = x_B \tg \beta_D + z_D - x_D \tg \beta_D$, $x_B = (z_D - x_D \tg \beta_D - z_C + x_C \tg(-\beta_C))/(\tg(-\beta_C) - \tg \beta_D)$, $a_0 = z_{O2}$; $a_2 = (z_B - a_0)/x_B^2$.

Предположим, что луч, выходящий из фокуса F , отражается от первого зеркала в некоторой точке P в интервале CD . Тогда угол между осью z и падающим лучом в точке P имеет вид

$$\alpha_{FP} = \arctg((x_P - x_F)/(z_P - z_F)),$$

где $z_P = z_1(x_P)$;

угол между осью x и касательной прямой первого зеркала в точке P –

$$\gamma_P = \arctg(z'_1(x_P)),$$

а угол между осью x и отраженным лучом в точке P –

$$\beta_{PQ} = 2\gamma_P + \alpha_{FP} - 90^\circ.$$

Предположим, что отраженный луч падает на второе зеркало в точке Q . Из геометрии на рис. 2 можно получить систему уравнений:

$$\begin{cases} z_Q = x_Q \operatorname{tg} \beta_{PQ} + z_P - x_P \operatorname{tg} \beta_{PQ}, \\ z_Q = a_2 x_Q^2 + a_0 \end{cases}, \quad (4)$$

решение которой имеет вид

$$\begin{cases} x_Q = \frac{\operatorname{tg} \beta_{PQ} \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta_{PQ} - 4a_2 a_0 + 4a_2 z_P - 4a_2 x_P \operatorname{tg} \beta_{PQ}}}{2a_2}, \\ z_Q = a_2 x_Q^2 + a_0 \end{cases}. \quad (5)$$

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

Из уравнения (3), получаем

$$t_Q = FD + DB + t_B - FP - PQ + |t_A - t_Q| \cos \beta. \quad (6)$$

Для определения нового участка первого зеркала предположим, что луч из фокуса F_2 , падающий на первое зеркало и отражающийся от него в некоторой точке N в интервале DW , попадет в точку Q во втором зеркале. Из уравнения (2) следует:

$$z_N = \frac{A_1 \pm A\sqrt{A_2 A_3} + A_4}{A_5}, \quad (7)$$

где

$$A = F_2 D + DA + t_A - t_Q - (x_Q - x_A) \times \\ \times \sin \alpha - |z_A - z_Q| \cos \beta + |t_A - t_Q| \cos \beta,$$

$$A_1 = A^2(z_{F_2} + y_Q) - (x_{F_2}^2 - x_Q^2)(z_{F_2} - z_Q) + \\ + z_{F_2} z_Q^2 + z_{F_2}^2 z_Q - z_{F_2}^3 - z_Q^3,$$

$$A_2 = -A^2 + x_{F_2}^2 - 2x_{F_2} x_Q + x_Q^2 + z_{F_2}^2 - 2z_{F_2} z_Q + z_Q^2,$$

$$A_3 = -A^2 + x_{F_2}^2 - 4x_N(x_{F_2} + x_Q) + 2x_{F_2}(x_Q - z_Q) + \\ + 4x_N^2 + x_Q^2 + z_{F_2}^2 + z_Q^2,$$

$$A_4 = 2x_{F_2} x_N z_{F_2} - 2x_{F_2} x_N z_Q - 2x_N x_Q z_{F_2} + 2x_N x_Q z_Q,$$

$$A_5 = 2A^2 - 2z_{F_2}^2 + 4z_{F_2} z_Q - 2z_Q^2,$$

а знак перед корнем в (7) выбирается так, чтобы значение z_N было положительным. Отсюда имеем угол между осью z и лучом $F_2 N$ –

$$\alpha_{F_2 N} = \arctg((x_{F_2} - x_N)/(z_N - z_{F_2}))$$

и угол между осью z и лучом NQ в точке N –

$$\beta_{NQ} = \arctg((x_N - x_Q)/(z_N - z_Q)).$$

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

$$\gamma_N = \frac{\alpha_{F_2 N} - \beta_{NQ}}{2}. \quad (8)$$

Для определения нового участка второго зеркала предположим, что луч из фокуса F_1 , падающий на первое зеркало и отражающийся от него в некоторой точке P в интервале CD , попадет в точку M в интервале BE второго зеркала. При этом луч из фокуса F , отражающийся от первого зеркала в точке N , тоже попадет в точку M в интервале BE второго зеркала. Отсюда угол между осью z и лучом $F_1 P$ имеет вид

$$\alpha_{F_1 P} = \arctg((x_P - x_{F_1})/(z_P - z_{F_1})),$$

угол между осью x и лучом PM в точке P –

$$\beta_{PM} = 2\gamma_P + \alpha_{F_1 P} - 90^\circ,$$

угол между осью z и лучом FN –

$$\alpha_{FN} = \arctg((x_N - x_F)/(z_N - z_F)),$$

угол между осью x и лучом NM в точке N –

$$\beta_{NM} = 2\gamma_N + \alpha_{FN} - 90^\circ.$$

Из геометрии на рис. 2 находим координаты точки M :

$$x_M = \frac{z_P - x_P \operatorname{tg} \beta_{PM} - z_N + x_N \operatorname{tg} \beta_{NM}}{\operatorname{tg} \beta_{NM} - \operatorname{tg} \beta_{PM}}, \quad (9)$$

$$z_M = x_M \operatorname{tg} \beta_{PM} + z_P - x_P \operatorname{tg} \beta_{PM}. \quad (10)$$

Из уравнения (1) для всех лучей, выходящих из фокуса F_1 , отражающихся от первого зеркала в интервале CD и от второго зеркала в интервале BE , и лучей, выходящих из фокуса F , отражающихся от первого зеркала в интервале DW и от второго зеркала в интервале BE , следует:

$$FD + DB + t_B - |t_M - t_B| \cos \beta = FN + NM + t_M, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} FD &= \sqrt{(x_D - x_F)^2 + (z_D - z_F)^2}, \\ DB &= \sqrt{(x_B - x_D)^2 + (z_B - z_D)^2}, \\ FN &= \sqrt{(x_N - x_F)^2 + (z_N - z_F)^2}, \\ NM &= \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (z_M - z_N)^2}. \end{aligned}$$

Вычитая уравнение (11) из уравнения (1), получаем

$$B + FN + NM = 0, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} B &= F_1C + CB + (x_M - x_B) \sin \alpha - \\ &- F_1P - PM - FD - DB + |z_M - z_B| \cos \beta. \end{aligned}$$

Решение уравнения (12) имеет вид

$$x_N = \frac{\pm B \sqrt{B_1 B_2} + B_3 + B_4}{B_5}, \quad (13)$$

где

$$B_1 = -B^2 + x_F^2 - 2x_F x_M + x_M^2 + z_F^2 - 2z_F z_M + z_M^2,$$

$$\begin{aligned} B_2 &= -B^2 + x_F^2 - 2x_F x_M + 2z_F z_M + \\ &+ x_M^2 + z_F^2 - 4z_N(z_F + z_M) + z_M^2 + z_N^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_3 &= B^2(x_F + x_M) + x_F(x_M^2 - x_F^2 + z_M^2) + \\ &+ x_M(x_F^2 + z_F^2 - z_M^2), \end{aligned}$$

$$B_4 = 2y_N(x_F - z_M)(z_F - z_M);$$

$$B_5 = 2B^2 - 2x_F^2 + 4x_F x_M - 2x_M^2,$$

а знак корня выбирается из условия положительной величины x_N .

Из уравнения (7) находим z_N , из уравнений (8)–(10) находим x_M и z_M , из уравнения (12) находим t_M . При перемещении точки P в интервале CD и перемещении точки Q в интервале AB соответственно находим участок DW первого зеркала, участок BE второго зеркала и расстояние t от второго зеркала в интервале BE до линии размещения центра щелей.

Повторяя аналогичную процедуру, получаем следующие участки зеркал и положения щелей.

3. АНАЛИЗ АБЕРРАЦИИ ТРЕХФОКАЛЬНОЙ ПЛАНАРНОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Для анализа нормированной СКА эйконала в апертуре трехфокальной планарной волноводно-щелевой АР при излучении вытекающей волны по нормали к волноводу ($\beta = 90^\circ$) синтезируем

два варианта решетки (для углов зрения 80° и 40°). Величину СКА определим по формуле

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

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 синтезе положения точек $F_1(x_{F1}, z_{F1})$, $F(x_F, z_F)$, $F_2(x_{F2}, z_{F2})$, $C(x_C, z_C)$, $O_2(x_{O2}, z_{O2})$ 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:

— для угла зрения 80°

$$\begin{aligned} x_{F1} &= -0.25, \quad z_{F1} = -0.23, \quad x_F = 0, \\ z_F &= -0.25, \quad x_{F2} = -0.25, \quad z_{F2} = -0.23, \\ x_C &= -0.08, \quad z_C = 0.25, \quad x_{O2} = 0, \\ z_{O2} &= -1.02; \quad t_B = 0.25; \end{aligned}$$

— для угла зрения 40° :

$$\begin{aligned} x_{F1} &= -0.25, \quad z_{F1} = -0.68, \quad x_F = 0, \\ z_F &= -0.707, \quad x_{F2} = -0.25, \\ z_{F2} &= -0.68, \quad x_C = -0.05, \\ z_C &= 0.25, \quad x_{O2} = 0, \quad z_{O2} = -0.52, \quad t_B = 0.25. \end{aligned}$$

На рис. 3а, 3б показаны зависимости величины СКА от угла зрения соответственно для первого и второго вариантов синтезированной трехфокальной планарной волноводно-щелевой АР, а также аналогичные зависимости двухзеркальной трехслойной бифокальной АР с прямолинейными линиями расположения щелей в соседних волноводах и формой зеркал, синтезированных в [12], и однозеркальной однослойной бифокальной АР [15].

Как видно из рис. 3, с уменьшением угла зрения в два раза СКА трехфокальной АР падает на порядок, а бифокальных решеток — в два-три раза. При этом в угле зрения 80° значение СКА трехфокальной трехслойной АР с двухзеркальной ДОС (0.8×10^{-4}) в семь раз меньше, чем двухслойной с однозеркальной ДОС (5.6×10^{-4}), и в 4.5 раза меньше, чем трехслойной с двухзеркальной ДОС (3.4×10^{-4}), а в угле 40° СКА трехфокальной трехслойной АР с двухзеркальной ДОС (0.2×10^{-5}) в 11 раз меньше, чем двухслойной с однозеркальной ДОС (2.2×10^{-4}) и в семь раз меньше, чем трехслойной с двухзеркальной ДОС (1.4×10^{-4}).

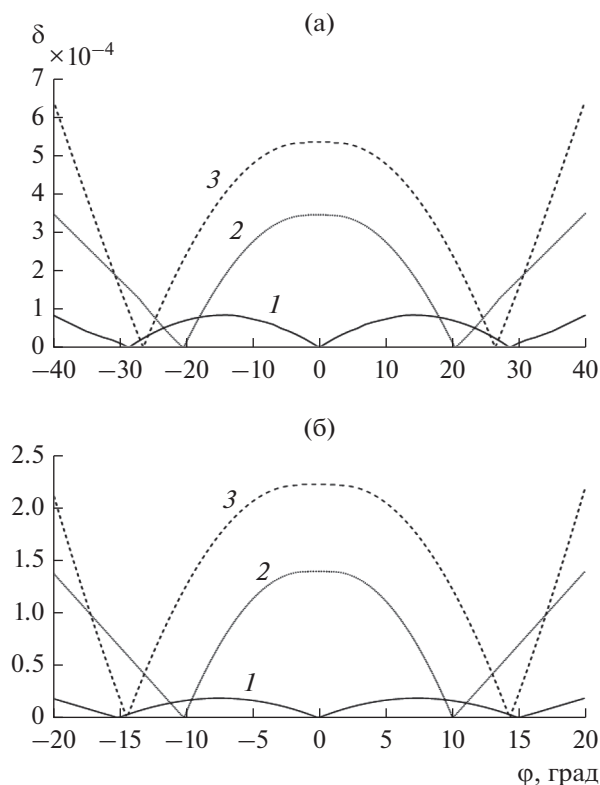


Рис. 3. Зависимость величины СКА от угла зрения: а) синтез для угла зрения 80°; б) синтез для угла зрения 40°; 1 – трехфокальная трехслойная АР, 2 – бифокальная трехслойная АР, 3 – бифокальная двухслойная АР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Для обеих исследованных в работе углов зрения минимальной величиной СКА обладает трехфокальная трехслойная антенная решетка, а максимальной – бифокальная двухслойная.

2. СКА бифокальной трехслойной антенной решетки с двухзеркальной ДОС в 1.5–2 раза меньше, чем двухслойной с однозеркальной ДОС, но в 5–7 раз больше, чем трехфокальной трехслойной антенной решетки с двухзеркальной ДОС.

3. Расположение щелей трехслойной трехфокальной и однослойной бифокальной антенной решетки 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. Калошин В.А. // Тр. 13-й Междунар. Крымской конф. "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо-2003). Севастополь, 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. IEEE Antennas and Propagation Int. Simp. (APSURSI) Chicago. 8–14 Jul. 2012. N.Y.: IEEE, 2012. P. 361.
6. Toan Vo Dai, Tuan Nguzen, Ozlem Kilic // Proc. IEEE Int. Simp. Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego. 9–14 Jul. 2017. N.Y.: IEEE, 2017. P. 2129.
7. Yi Liu, Hu Yang, Zusheng Jin, Jiang Zhu // IET Microwave Antennas Propagation. 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.pdf>.
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.
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., Ле Д.Т., Фролова Е.В. // РЭ. 2019. Т. 64. № 8. С. 768.