

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.4

УДК 621.396.67

ТРЕХФОКАЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ

В. А. Калошин¹, Д. Т. Ле²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125007, г. Москва, ул. Моховая д. 11, стр.7

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Статья поступила в редакцию 25 марта 2020 г.

Аннотация. Синтезированы и исследованы трехслойная двухзеркальная и двухслойная зеркально-линзовая трехфокальные планарные волноводно-щелевые антенные решётки. Проведено исследование аберраций антенных решеток, оптимизированных для угла зрения 80 градусов и характеристик сканирования луча при перемещении облучателя по фокальной кривой. Проведено сравнение бифокальных и трехфокальных антенных решеток.

Ключевые слова: многолучевая антенна, трехфокальная система, волноводно-щелевая антенная решетка.

Abstract. The three-layer two-mirror and two-layer mirror-lens three-focal planar waveguide-slot antenna arrays were synthesized and investigated. A study was made of the aberrations of antenna arrays optimized for an angle of view of 80 degrees and the characteristics of beam scanning when the feed element moves along the focal curve. Bifocal and three-focal antenna arrays are compared.

Key words: multi-beam array, three focal system, waveguide-slot antenna array.

Введение. Планарные сканирующие и многолучевые антенные решетки с квазиоптическим формированием лучей рассматривалась в ряде работ [1 - 4]. В простейшем случае конструкция содержит два слоя, которые связаны между собой параболической щелью или системой отверстий и замкнуты параболическим зеркалом [2, 3]. На первом этаже расположены облучатели, на втором волноводно-

щелевая антенная решетка (ВЩАР). Из-за aberrаций при сдвиге облучателя из фокуса параболического зеркала такая антенна не может обеспечить широкоугольную многолучевую диаграмму направленности. В работе [1] для уменьшения aberrаций в качестве диаграммо-образующей системы (ДОС) решетки использована бифокальная волноводная зеркально-линзовая система, в работе [4] – трехфокальная система на основе микрополосковой линзы Ротмана. В работах [5, 6] синтезирована и оптимизирована, а в работе [7] – экспериментально исследована двухзеркальная апланатическая ДОС, в работе [8] – синтезирована и исследована двухзеркальная бифокальная ДОС, в работе [9] – трехзеркальная апланатическая ДОС, в работе [10] – трехфокальная волноводная зеркально-линзовая ДОС с одинаковыми длинами волноводов, а работе [11] – синтезирована и исследована линзовая бифокальная ДОС. Применение линзовых и зеркально-линзовых систем с принудительным преломлением приводит к усложнению конструкции и увеличению потерь ДОС. В работе [12] предложена и исследована бифокальная волноводно-щелевая антенная решетка на основе простой двухслойной конструкции с эллиптическим зеркалом. В работе [13] исследована многолучевые волноводно-щелевые антенные решетки с бифокальной двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС. В работах [12, 13] показана возможность формирования многолучевой диаграммы в угле зрения 60 градусов. Дальнейшее расширение угла зрения и увеличение числа лучей ограничивается aberrациями бифокальной системы.

В данной работе рассматриваются задачи синтеза и анализа планарных трехфокальных волноводно-щелевых антенных решеток.

1. Синтез трехфокальной двухзеркальной волноводно-щелевой антенной решетки

Конструкция синтезируемой антенной решетки (рис. 1) состоит из трех слоев: первого – в виде планарного волновода (1) с расположенными на фокальной линии облучателем (2), второго – в виде планарного волновода (3),

связанного через криволинейную щель (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), (6) планарных волноводов, замыкаются конформными щелями зеркалами. Полотно волноводно-щелевой антенной решётки (4) состоит из линейных антенн в виде прямоугольных волноводов с четырьмя периодически расположенными продольными щелями на широких стенках и синусоидальным амплитудным распределением вытекающей моды вдоль волноводов решетки (7). Такая линейная антенна была предложена и исследована в работе [14].

Цилиндрическая волна, излученная источником (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 этаже. 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 меняются фазовые соотношения между модами прямоугольных волноводов и, в результате, осуществляется сканирование луча антенны. При расположении на фокальной кривой нескольких облучателей реализуется многолучевой режим излучения антенной решетки.

Задача синтеза антенной решетки 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 двумерной трехзеркальной системы, с одной стороны которой расположены два симметричных относительно оси z фокуса (точки идеальной фокусировки F_1 и F_2), третий фокус лежит на этой оси (точка F), а второе и третье зеркало соединены линиями передачи (волноводами), параллельными этой оси (рис.2).

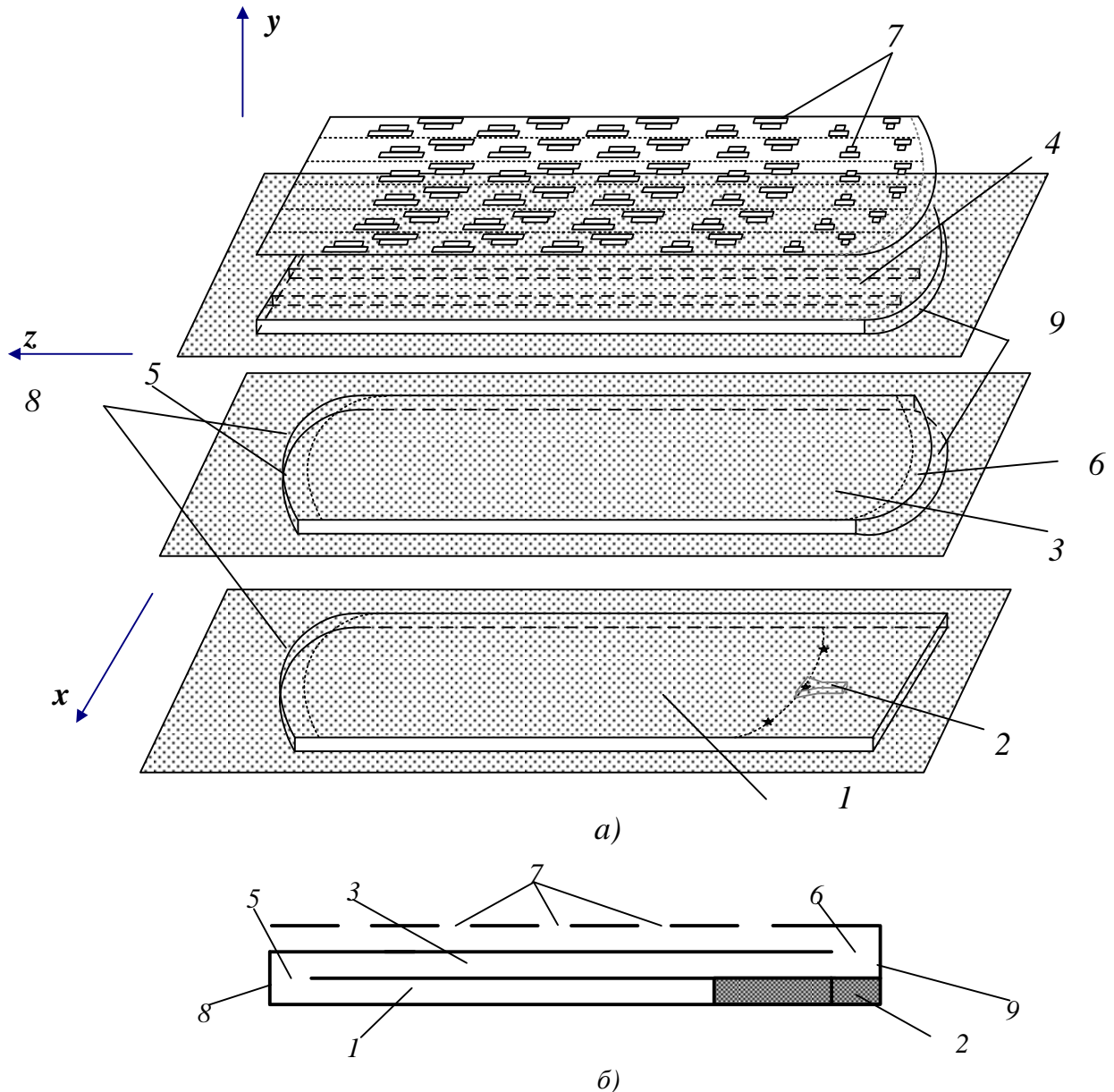


Рис. 1. Конструкция трехслойной планарной волноводно-щелевой антенной решетки.

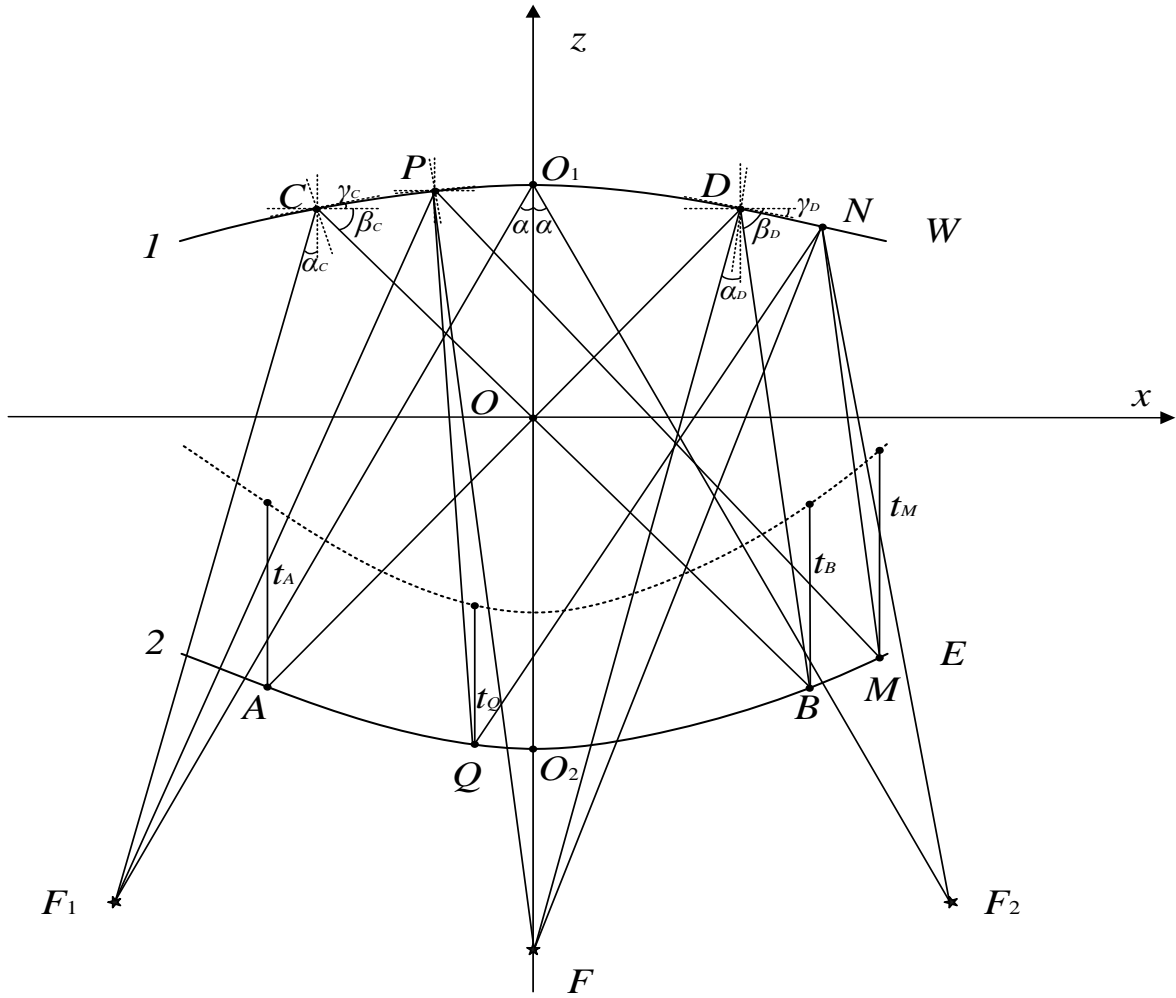


Рис. 2. К синтезу формы зеркал и положения щелей.

Потребуем, чтобы эйконалы (оптические длины путей) лучей источника цилиндрической волны, расположенного в фокусе F_1 , F_2 или F , после последовательного отражения от двух зеркал и прохождения через линии передачи в точках пересечения этих линий с третьим зеркалом удовлетворяли, соответственно, условиям:

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{где } FP &= \sqrt{(x_F - x_P)^2 + (z_F - z_P)^2}; FD = \sqrt{(x_F - x_D)^2 + (z_F - z_D)^2}; \\ PQ &= \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}; DB = \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (z_D - z_B)^2} \\ F_2D &= \sqrt{(x_{F_2} - x_D)^2 + (z_{F_2} - z_D)^2}; DA = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (z_D - z_A)^2}; \\ F_2N &= \sqrt{(x_{F_2} - x_N)^2 + (z_{F_2} - z_N)^2}; NQ = \sqrt{(x_N - x_Q)^2 + (z_N - z_Q)^2}; \\ F_1C &= \sqrt{(x_C - x_{F_1})^2 + (z_C - z_{F_1})^2}; CB = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (z_B - z_C)^2}; \\ F_1P &= \sqrt{(x_P - x_{F_1})^2 + (z_P - z_{F_1})^2}; PM = \sqrt{(x_M - x_P)^2 + (z_M - z_P)^2}; \end{aligned}$$

где 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), $\cos \beta = \frac{\gamma p - 2\pi}{kp}$, γ - 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 антенной решетки сводится к определению функций $z_1(x)$, $z_2(x)$ и $t(x)$, удовлетворяющих системе уравнений (1) – (3).

Предположим, что луч из первого фокуса F_1 (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 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 параболической функции: $z_2(x) = a_2x^2 + a_0$, 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: угол $\alpha = \arctg(x_{F1}/(z_{F1} - z_{O1}))$; угол между осью z и лучом F_1C в точке C $\alpha_C = \arctg((x_C - x_{F1})/(z_C - z_{F1}))$; угол между осью z и лучом FD в точке D $\alpha_D = \arctg((x_D - x_F)/(z_D - z_F))$; $x_D = -x_C, z_D = z_C$;
 $\gamma_C = (90^\circ - \alpha_C - \beta_C)/2$; $b_2 = \text{tg}\gamma_C/(2x_C)$; $b_0 = y_C - b_2x_C^2$; $\gamma_D = -\gamma_C$;
 $\beta_D = \alpha_D + 2\gamma_D - 90^\circ$;
 $x_B = (z_D - x_D \text{tg}\beta_D - z_C + x_C \text{tg}(-\beta_C))/(\text{tg}(-\beta_C) - \text{tg}\beta_D)$;
 $z_B = x_B \text{tg}\beta_D + z_D - x_D \text{tg}\beta_D$; $a_0 = z_{O2}$; $a_2 = (z_B - a_0)/x_B^2$.

Предположим, что луч 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 - $\alpha_{FP} = \arctg((x_P - x_F)/(z_P - z_F))$, где $z_P = z_1(x_P)$; $\gamma_P = \arctg(z'_1(x_P))$ – угол между осью x и касательной прямой первого зеркала в точке P ;
 $\beta_{PQ} = 2\gamma_P + \alpha_{FP} - 90^\circ$ - угол между осью x и отраженным лучом в точке P .
 Предположим, что отраженный луч падает на второе зеркало в точке Q . Из геометрии на рис. 2 можно получить систему уравнений:

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

Решение системы уравнений (4) имеет вид:

$$\begin{cases} x_Q = \frac{\operatorname{tg}\beta_{PQ} \pm \sqrt{\operatorname{tg}\beta_{PQ}^2 - 4a_2a_0 + 4a_2z_P - 4a_2x_P\operatorname{tg}\beta_{PQ}}}{2a_2} \\ z_Q = a_2x_Q^2 + a_0 \end{cases} \quad (5)$$

Знак перед корнем выбирается так, чтобы значение x_Q было действительным 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 в втором зеркале. Из уравнения (2) следует:

$$z_N = \frac{A_1 \pm A\sqrt{A_2A_3} + A_4}{A_5} \quad (7)$$

где $A = F_2D + DA + t_A - t_Q - (x_Q - x_A) \sin \alpha - |z_A - z_Q| \cos \beta + |t_A - t_Q| \cos \beta$;

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

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

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

$$A_4 = 2x_{F_2}x_Nz_{F_2} - 2x_{F_2}x_Nz_Q - 2x_Nx_Qz_{F_2} + 2x_Nx_Qz_Q;$$

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

а знак перед корнем в (7) выбирается так, чтобы значение z_N было положительным. Отсюда имеем: $\alpha_{F_2N} = \operatorname{arctg}((x_{F_2} - x_N)/(z_N - z_{F_2}))$ - угол между осью z и лучом F_2N ; $\beta_{NQ} = \operatorname{arctg}((x_N - x_Q)/(z_N - z_Q))$ - угол между осью z и лучом NQ в точке N .

Из геометрии на рис. 2 следует, что угол между осью x и касательной к первому зеркалу в точке N :

$$\gamma_N = \frac{\alpha_{F_2N} - \beta_{NQ}}{2} \quad (8)$$

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 имеем: угол между осью z и лучом F_1P $\alpha_{F_1P} = \arctg((x_P - x_{F_1})/(z_P - z_{F_1}))$; угол между осью x и лучом PM в точке P $\beta_{PM} = 2\gamma_P + \alpha_{F_1P} - 90^0$; 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 $\beta_{NM} = 2\gamma_N + \alpha_{FN} - 90^0$.

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

$$FN = \sqrt{(x_N - x_F)^2 + (z_N - z_F)^2}; NM = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (z_M - z_N)^2}.$$

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

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

где $B = F_1C + CB + (x_M - x_B) \sin \alpha - F_1P - PM - FD - DB + |z_M - z_B| \cos \beta$.

Решение уравнения (12) имеет вид:

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

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

$B_2 = -B^2 + x_F^2 - 2x_F x_M + 2z_F z_M + x_M^2 + z_F^2 - 4z_N(z_F + z_M) + z_M^2 + z_N^2$;

$B_3 = B^2(x_F + x_M) + x_F(x_M^2 - x_F^2 + z_M^2) + x_M(x_F^2 + z_F^2 - z_M^2)$;

$B_4 = 2y_N(x_F - z_M)(z_F - z_M)$; $B_5 = 2B^2 - 2x_F^2 + 4x_F x_M - 2x_M^2$.

а знак корня выбирается из условия положительной величины x_N .

Из уравнения (7) находим z_N , из уравнений (8), (9) и (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 находим, соответственно, 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.

2. Синтез трехфокальной зеркально-линзовой волноводно-щелевой антенной решетки

Синтезируемая антенная решетка (рис. 3) состоит из двух слоев: первого - в виде планарного волновода (1) с диэлектрической линзой (2) и расположенным на фокальной линии облучателем (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) замыкается конфокальным щели зеркалом. Полотно волноводно-щелевой

антенной решётки (4) состоит из линейных антенн вытекающей волны описанных выше (раздел 1).

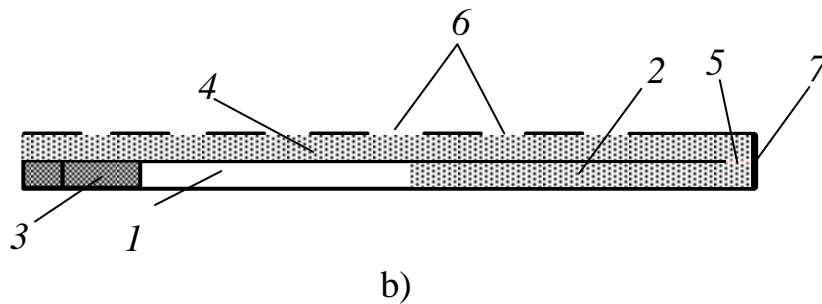
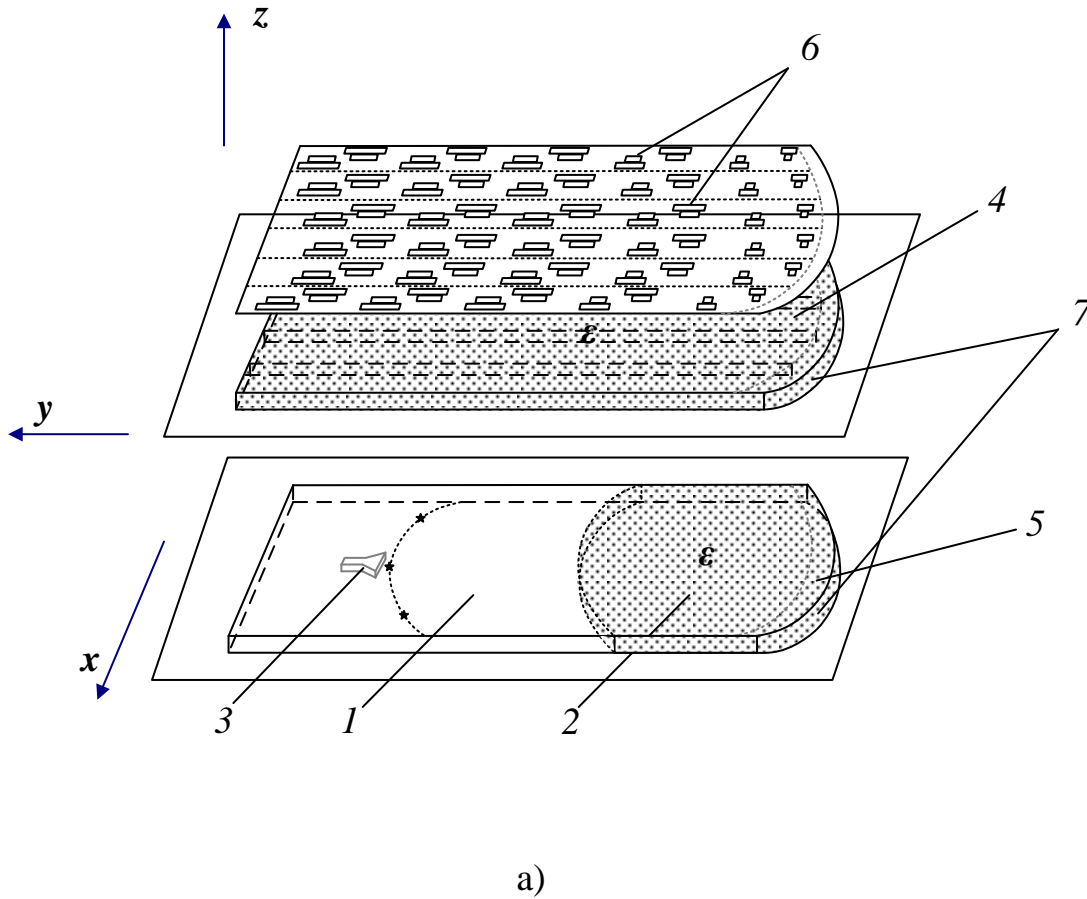


Рис. 3. Конструкция трехфокальной линзово-зеркальной планарной волноводно-щелевой антенной решётки.

Цилиндрическая волна, излученная 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 антенной решетки.

Задача синтеза антенной решетки 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 облучателей в трех фокусах.

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:

$$\begin{aligned} F_1A + nAB + nt_B + (x_N - x_B) \sin \alpha + |z_N - z_B| \cos \beta - |t_N - t_B| \cos \beta = \\ = F_1P + nPN + nt_N \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_2M + nMQ + nt_Q + (x_Q - x_D) \sin \alpha + |z_D - z_Q| \cos \beta - |t_D - t_Q| \cos \beta = \\ = F_2C + nCD + nt_D \end{aligned} \quad (15)$$

$$FP + nPQ + nt_Q - |t_B - t_Q| \cos \beta = FC + nCB + nt_B \quad (16)$$

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

$$PQ = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (z_P - z_Q)^2}$$
; $CB = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (z_C - z_B)^2}$;

$$F_2C = \sqrt{(x_{F_2} - x_C)^2 + (z_{F_2} - z_C)^2}; CD = \sqrt{(x_C - x_D)^2 + (z_C - z_D)^2};$$

$$F_2M = \sqrt{(x_{F_2} - x_M)^2 + (z_{F_2} - z_M)^2}; MQ = \sqrt{(x_M - x_Q)^2 + (z_M - z_Q)^2};$$

$$F_1A = \sqrt{(x_A - x_{F_1})^2 + (z_A - z_{F_1})^2}; AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (z_A - z_B)^2};$$

$$F_1P = \sqrt{(x_P - x_{F_1})^2 + (z_P - z_{F_1})^2}; PN = \sqrt{(x_N - x_P)^2 + (z_N - z_P)^2};$$

n – коэффициент преломления; α – угол между осью z и лучам F_1O ; t_Q, t_B, t_D, t_N – расстояния от соответствующих точек до линии размещения центров щелей, β – угол излучения -1 пространственной гармоники вытекающей волны относительно оси волновода (Oz), $\cos \beta = \frac{\gamma p - 2\pi}{kp}$, 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. 4.

Таким образом, задача синтеза антенной решетки сводится к определению функций $z_1(x)$, $z_2(x)$ и $t(x)$, удовлетворяющих системе уравнений (14) – (16).

Предположим, что луч из первого фокуса F_1 (рис. 4) преломляется линзой в точке A (x_A, z_A) и попадает на зеркало в точке B (x_B, z_B). А луч из второго фокуса F преломляется линзой в точке C (x_C, z_C) и тоже попадает 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_{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 .

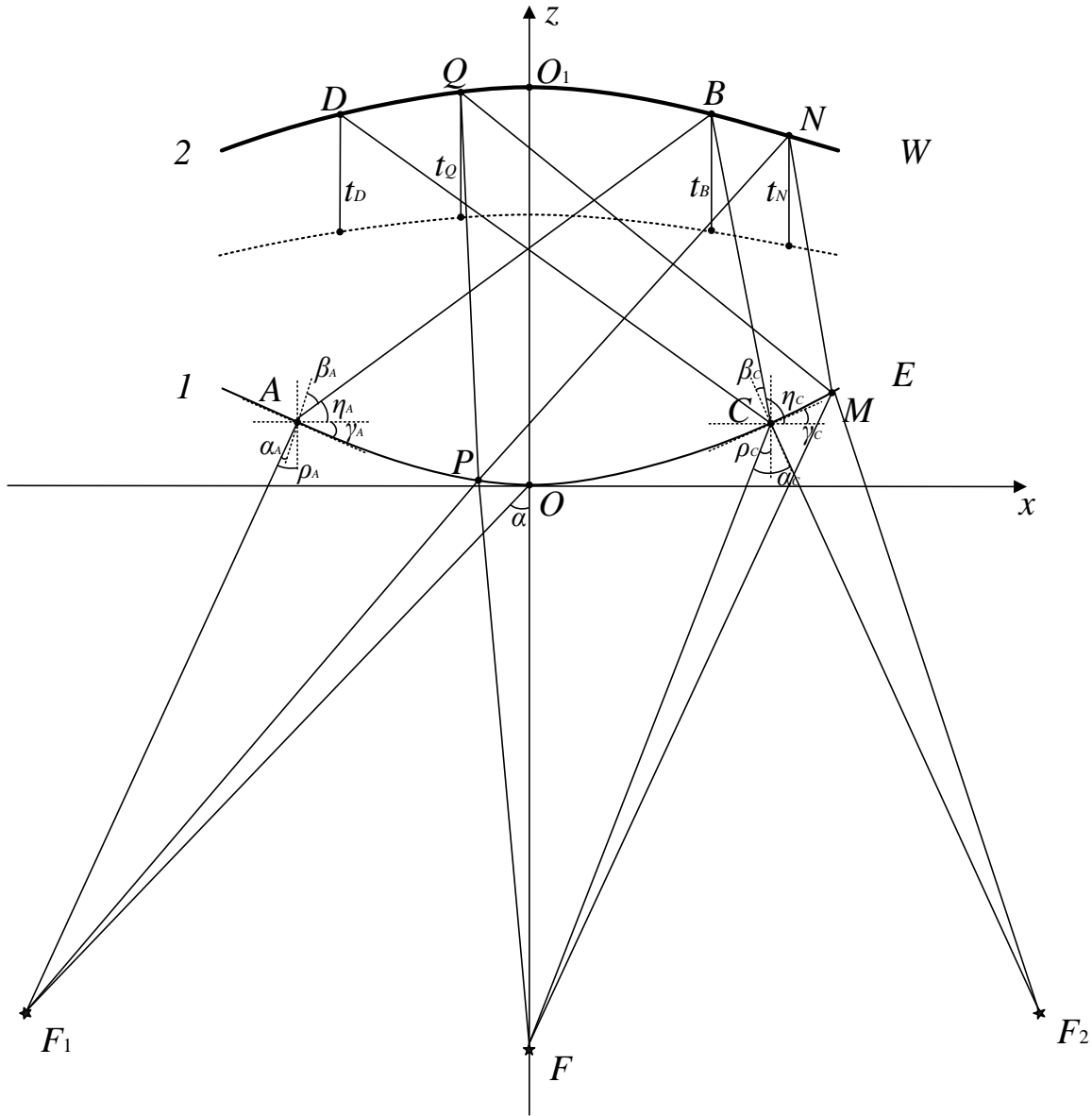


Рис. 4. К синтезу входной поверхности линзы, формы зеркала и положения щелей.

Из геометрии на рис. 4 следует: угол $\alpha = \arctg(x_{F1} / z_{F1})$; $a_2 = tg\gamma_A / (2x_A)$; $y_A = a_2 x_A^2$; угол между осью z и падающим лучом F_1A в точке A - $\rho_A = \arctg((x_A - x_{F1}) / (z_A - z_{F1}))$; 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 -
 $\eta_C = 90^\circ + \gamma_C - \beta_C$; $b_0 = y_{O1}$; $b_2 = (z_B - b_0) / x_B^2$;
 $x_B = (z_C - x_C \operatorname{tg} \eta_C - z_A + x_A \operatorname{tg} \eta_A) / (\operatorname{tg} \eta_A - \operatorname{tg} \eta_C)$; $z_B = x_B \operatorname{tg} \eta_A + z_A - x_A \operatorname{tg} \eta_A$;
 $x_D = -x_B$; $z_D = z_B$.

Предположим, что луч из фокуса F преломляется линзой в некоторой точке P в интервале AC и попадает на зеркало в точке Q в интервале BD . Тогда угол между осью z и падающим лучом в точке P - $\rho_P = \arctg((x_P - x_F)/(z_P - z_F))$, где $z_P = z_1(x_P)$; $\gamma_P = \arctg(z'_1(x_P))$ - угол между осью x и касательной прямой линзы в точке 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. 4 получим систему уравнений:

$$\begin{cases} z_Q = x_Q \operatorname{tg} \eta_P + z_P - x_P \operatorname{tg} \eta_P \\ z_Q = b_2 x_Q^2 + b_0 \end{cases} \quad (17)$$

Решение системы уравнений (17) имеет вид:

$$\begin{cases} x_Q = \frac{\operatorname{tg} \eta_P \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \eta_P - 4b_2 b_0 + 4b_2 z_P - 4b_2 x_P \operatorname{tg} \eta_P}}{2b_2} \\ z_Q = b_2 x_Q^2 + b_0 \end{cases} \quad (18)$$

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

Из уравнения (16), получаем:

$$t_Q = (FC + nCD + nt_B - FP - nPQ + |t_B - t_Q| \cos \beta) / n \quad (19)$$

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

$$\text{где } F_2M = \sqrt{(x_M - x_{F_2})^2 - (z_M - z_{F_2})^2}, \quad MQ = \sqrt{(x_M - x_Q)^2 - (z_M - z_Q)^2} \quad (20)$$

Из уравнения (15) следует:

$$F_2C + nCD + nt_D = u + nv + nt_Q + (x_Q - x_D) \sin \alpha + |z_D - z_Q| \cos \beta - |t_D - t_Q| \cos \beta \quad (21)$$

Отсюда, получаем:

$$u = A - nv \quad (22)$$

где $A = F_2C + nCD + nt_D - nt_Q - (x_Q - x_D) \sin \alpha - |z_D - z_Q| \cos \beta + |t_D - t_Q| \cos \beta$.

Из уравнения (20) и (22) получаем:

$$z_M = \frac{B - x_M(2x_{F_2} - 2x_Q)}{2z_{F_2} - 2z_Q} \quad (23)$$

$$x_M = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1} \quad (24)$$

где $B = v^2 - u^2 + x_{F_2}^2 + z_{F_2}^2 - x_Q^2 - z_Q^2$; $A_1 = 1 + (2x_{F_2} - 2x_Q)^2 / (2z_{F_2} - 2z_Q)^2$;

$$A_2 = \frac{2(2x_{F_2} - 2x_Q)z_{F_2}}{2z_{F_2} - 2z_Q} - \frac{2B(2x_{F_2} - 2x_Q)}{(2z_{F_2} - 2z_Q)^2} - 2x_{F_2};$$

$$A_3 = \frac{B^2}{(2z_{F_2} - 2z_Q)^2} - \frac{2Bz_{F_2}}{2z_{F_2} - 2z_Q} - u^2 + x_{F_2}^2 + z_{F_2}^2.$$

Знак перед корнем в (24) выбирается так, чтобы значение z_M было положительным. Отсюда имеем: $\rho_M = \arctg((x_M - x_{F_2}) / (z_M - z_{F_2}))$ – угол между осью z и лучом F_2M .

Из геометрии на рис. 4 следует, что угол между осью x и касательной прямой линзы в точке M :

$$\gamma_M = \arctg\left(\frac{n \sin A_4 - \sin \rho_M}{\cos \rho_M - n \cos A_4}\right) \quad (25)$$

где $A_4 = \arctg\left(\frac{z_Q - z_M}{x_M - x_Q}\right) - 90^0$.

Для определения нового участка зеркала предположим, что луч из фокуса F_1 , падающий на линзу и преломляющийся от неё в некоторой точке P в интервале AC , попадет в точку N в интервале BW зеркала. При этом луч из фокуса F , преломляющийся 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 - $\eta_{PN} = 90^0 + \gamma_P - \beta_{PF_1}$; угол между осью z и падающим лучом FM в точке M - $\rho_{FM} = \arctg((x_M - x_F)/(z_M - z_F))$; угол падения из фокуса F в точке M - $\alpha_{FM} = \rho_{FM} + \gamma_M$; угол преломления из фокуса F в точке M - $\beta_{FM} = \arcsin(\sin \alpha_{FM}/n)$; угол между осью x и лучом MN в точке M - $\eta_{MN} = 90^0 + \gamma_M - \beta_{FM}$. Из геометрии на рис. 4 находим координаты точки N :

$$x_N = \frac{z_P - x_P \operatorname{tg} \eta_{PN} - z_M + x_M \operatorname{tg} \eta_{MN}}{\operatorname{tg} \eta_{MN} - \operatorname{tg} \eta_{PN}} ; \quad (26)$$

$$z_N = x_N \operatorname{tg} \eta_{PN} + z_P - x_P \operatorname{tg} \eta_{PN} . \quad (27)$$

Из уравнения (14) для всех лучей, выходящих из фокуса F_1 , преломляющихся линзой в интервале AC и отражающихся от зеркала в интервале BW , до фронта, и лучей, выходящих из фокуса F , преломляющихся линзой в интервале CE и отражающихся от зеркала в интервале BW следует:

$$FC + nCB + nt_B - |t_N - t_B| \cos \beta = FM + nMN + nt_N \quad (28)$$

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 (28) из уравнения (14), получаем:

$$C - nPN + FM + nMN + (x_N - x_B) \sin \alpha = 0 \quad (29)$$

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

Из уравнения (29) находим u , из уравнений (22), (23) и (24) находим v , x_M и z_M , из уравнения (26) и (27) находим x_N и z_N , из уравнения (28) 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 центра щелей.

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

3. Анализ трехфокальных волноводно-щелевых антенных решеток

Проведем исследование нормированной среднеквадратической аберрации (СКА) эйконала в апертуре трехфокальных волноводно-щелевых антенных решеток, ограничиваясь вариантами синтезированных решеток для угла зрения 80° и излучения вытекающей волны по нормали к волноводу ($\beta = 90^\circ$). Величину СКА определим формулой:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - L_o)^2 / N}; \quad (30)$$

где L_i – длина оптического пути луча с номером i от источника до излученного плоского фронта; L_o – длина центрального луча; $N = 50$ – число учтенных лучей.

Для трехфокальной двухзеркальной волноводно-щелевой антенной решетки 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 таким образом, чтобы величина СКА в заданных углах зрения была наименьшей. В результате оптимизации получаем следующие величины параметров для угла зрения 80 градусов: $x_{F1} = -0.25$; $z_{F1} = -0.23$; $x_F = 0$; $z_F = -0.25$; $x_{F2} = -0.25$; $z_{F2} = -0.23$; $x_C = -0.08$; $z_C = 0.25$; $x_{O2} = 0$; $z_{O2} = -1.02$; $t_B = 0.25$.

Для трехфокальной зеркально-линзовой волноводно-щелевой антенной решетки 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 расстояния 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 градусов: $x_{F1} = -0.25$; $z_{F1} = -0.45$; $x_F = 0$; $z_F = -0.5$; $x_{F2} = 0.25$; $z_{F2} = -0.45$; $x_A = -0.09$; $\gamma_A = -0.09$; $t_B = 0.25$.

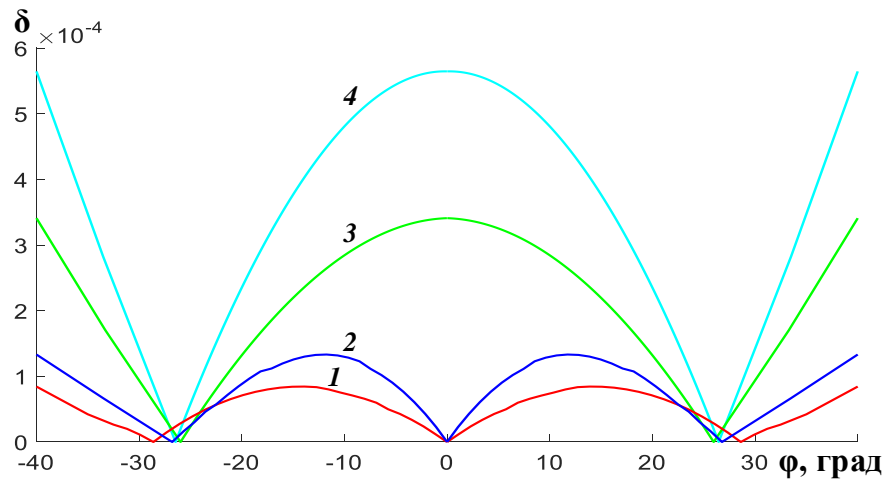


Рис. 5. Зависимости СКА от угла зрения (1 – трехфокальная двухзеркальная, 2 – трехфокальная зеркально-линзовая, 3 – бифокальная двухзеркальная, 4 – бифокальная однозеркальная).

На рис. 5 показаны зависимости СКА бифокальных и трехфокальных антенных решеток от угла зрения (азимутального угла φ). Как видно на рисунке, в угле зрения 80 градусов значение СКА трехфокальной двухзеркальной волноводно-щелевой антенной решетки ($0.8 \cdot 10^{-4}$) в 1.5 раза меньше, чем

зеркально–линзовой ($1.2 \cdot 10^{-4}$), в 7 раз меньше, чем однозеркальной ($5.6 \cdot 10^{-4}$) [12] и в 4 раза меньше, чем двухзеркальной бифокальной ($3.4 \cdot 10^{-4}$) [8].

Для определения зависимости величины КИП и диаграммы направленности (ДН) антенных решеток, используем найденные величины aberrаций эйконала и формулу:

$$D(\varphi, \theta) = D_0(\varphi, \theta) \sum_{i=1}^N A_i \exp(ik(L_i - L_0)), \quad (31)$$

где $D(\varphi, \theta)$ – ДН планарной антенной решетки, $D_0(\varphi, \theta)$ – диаграмма направленности линейной волноводно-щелевой антенны, A_i - амплитуда моды в каждой линейке, N – количество линейных антенн в планарной антенной решетке; L_i – эйконалы лучей до щели на первой линии с координатой x , соответствующей положению оси i -го волновода; L_0 – длина соответствующего эйконала для центрального волновода.

Для обеспечения согласования при излучении по нормали и формирования синусоидального распределения вытекающей волны вдоль волноводов решетки была проведена оптимизация длины щелей (L_1, L_2) и их относительное положение (d) на периоде (рис. 6) на широкой стенке прямоугольного волновода сечением 5×1.6 мм, заполненного диэлектриком с относительной проницаемостью $\epsilon = 2.2$. Результаты оптимизации приведены в таб. 1.

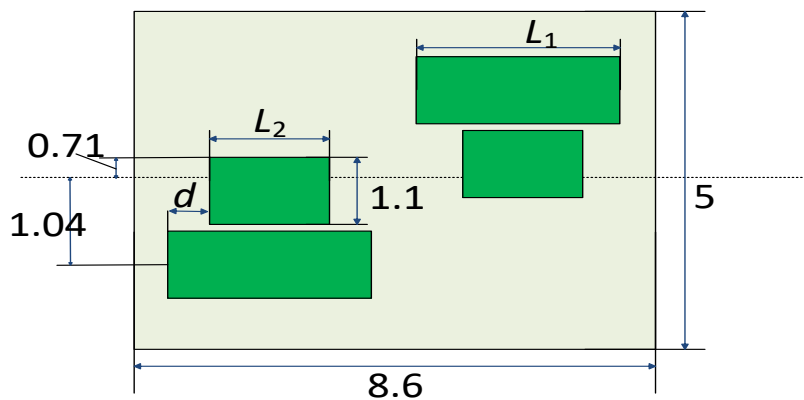


Рис. 6. Период с четырьмя продольными щелями.

Таб. 1. Длины щелей (L_1 , L_2) и их относительное положение (d).

Номер	L_1 (мм)	L_2 (мм)	d (мм)
1	1.851	0.1	1.075
2	2.399	0.53	1.135
3	2.656	0.72	1.168
4	2.827	0.83	1.199
5	2.958	1.01	1.174
6	3.065	1.19	1.138
7	3.157	1.36	1.099
8	3.238	1.51	1.084
9	3.312	1.7	1.026
10	3.381	1.89	0.966
11	3.445	2.31	0.808
12	3.505	2.39	0.798
13	3.56	2.4	0.83
14	3.611	2.45	0.841
15	3.654	2.44	0.867
16	3.682	2.5	0.851
17	3.685	2.5	0.853
18	3.637	2.47	0.844
19	3.479	2.4	0.78
20	2.988	1.04	1.174

На рис. 7 и 8 приведены диаграммы направленности и зависимость величины КИП от угла зрения двухзеркальной и зеркально-линзовой трехфокальных антенных решеток, рассчитанные на частоте 30 ГГц (частота излучения по нормали) по описанной выше методике. Все планарные антенные

решетки содержат 40 линейных антенн длиной 172 мм. ДН линейной волноводно-щелевой антенны рассчитывалась с использованием метода конечных элементов в программной среде Ansys HFSS.

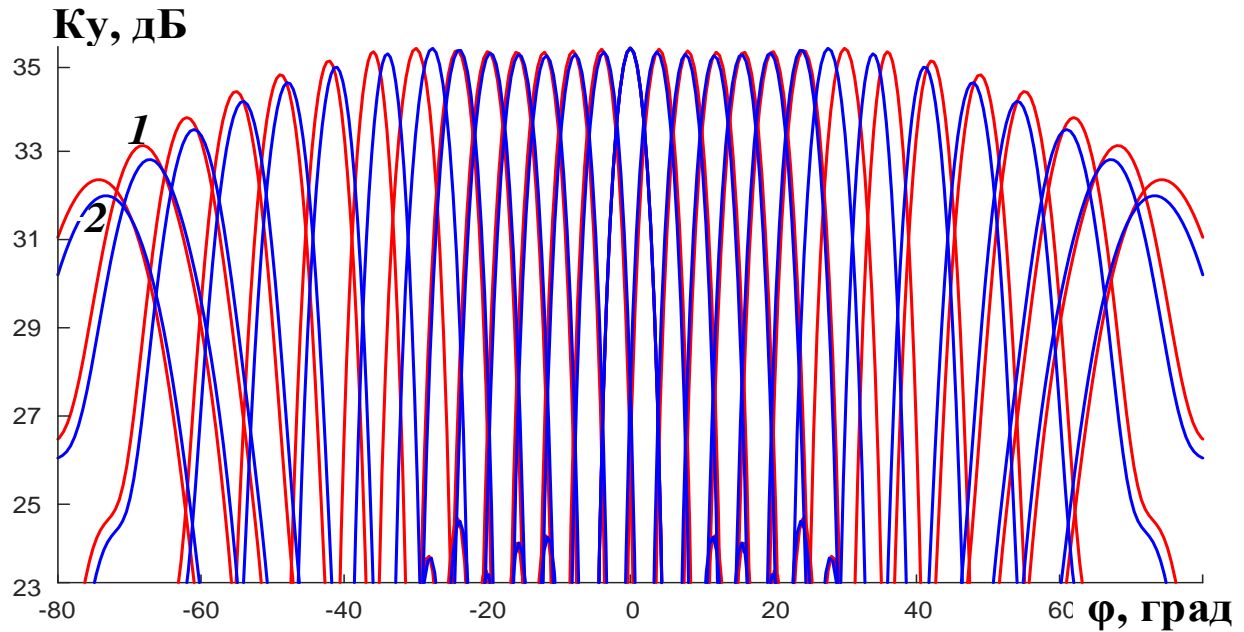


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления от угла зрения (1 - трехфокальная двухзеркальная решетка, 2 - трехфокальная зеркально-линзовая решетка).

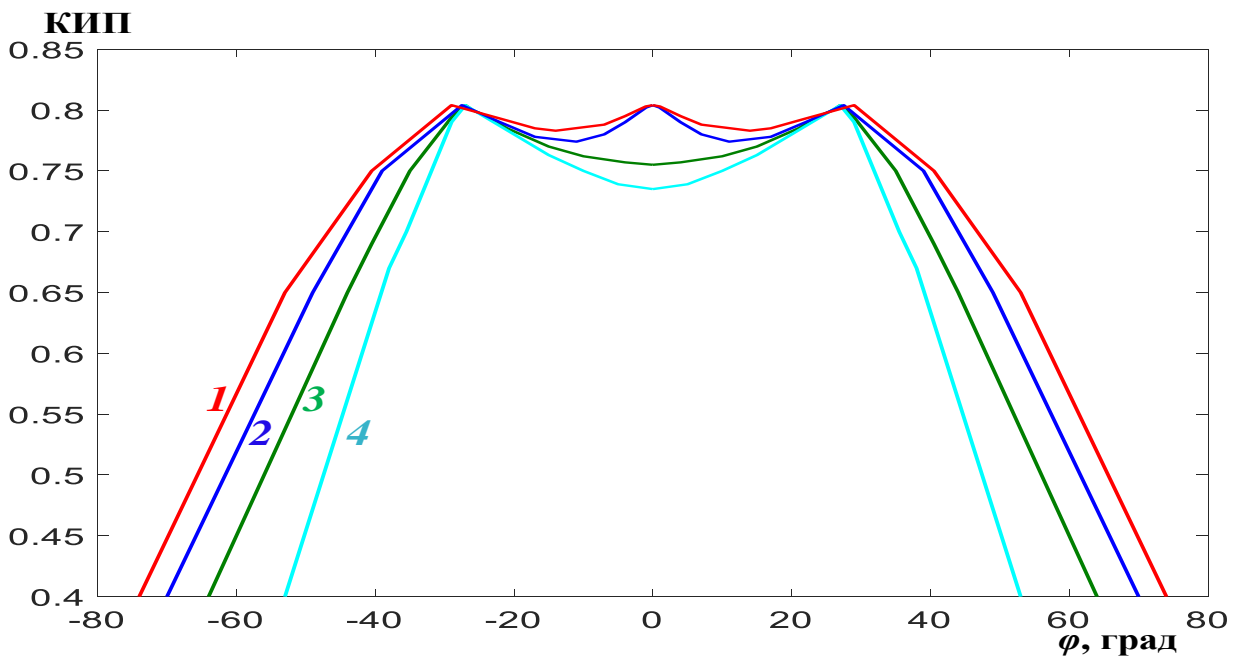


Рис. 8. Зависимость величины КИП от угла зрения (1- трехфокальная двухзеркальная, 2 - трехфокальная зеркально-линзовая, 3 - бифокальная двухзеркальная, 4 – бифокальная однозеркальная).

На рисунках видно, что у всех антенных решеток, несмотря на то, что они были синтезированы и оптимизированы по минимуму СКА в угле зрения 80 градусов, угол зрения по уровню КИП = 0.5 у трехфокальных решеток - более 130 градусов, у бифокальной двухзеркальной – более 110 градусов, а у бифокальной однозеркальной – более 80 градусов. Это угол может быть увеличен еще больше при допущении снижения величины КИП до уровня 0,5 внутри сектора сканирования.

На рис. 9 и 10 приведены диаграммы направленности и зависимость величины КИП от угла частотного сканирования (угла места ϑ) для положения источника на оси Z.

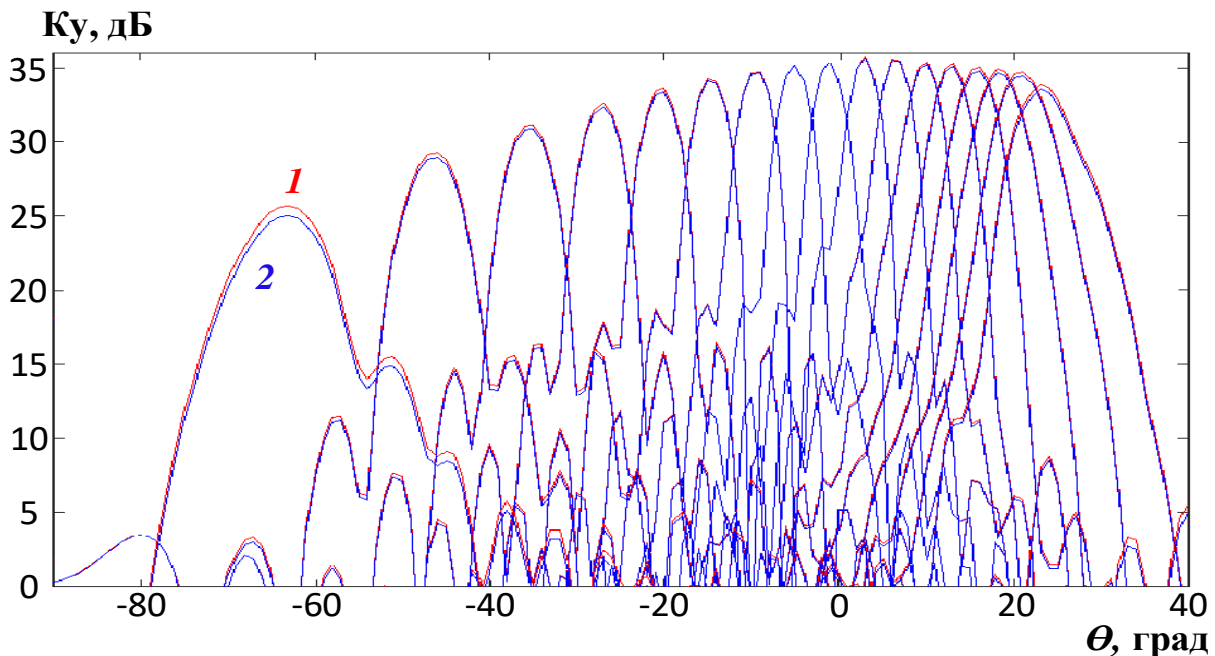


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления от угла места (1 - трехфокальная двухзеркальная решетка, 2 - трехфокальная зеркально-линзовая решетка).

На рисунках видно, что сектор частотного сканирования по уровню КИП = 0.5 бифокальной двухзеркальной антенной решетки – более 60 градусов, трехфокальных антенных решеток – около 50 градусов, бифокальной однозеркальной антенной решетки – около 30 градусов.

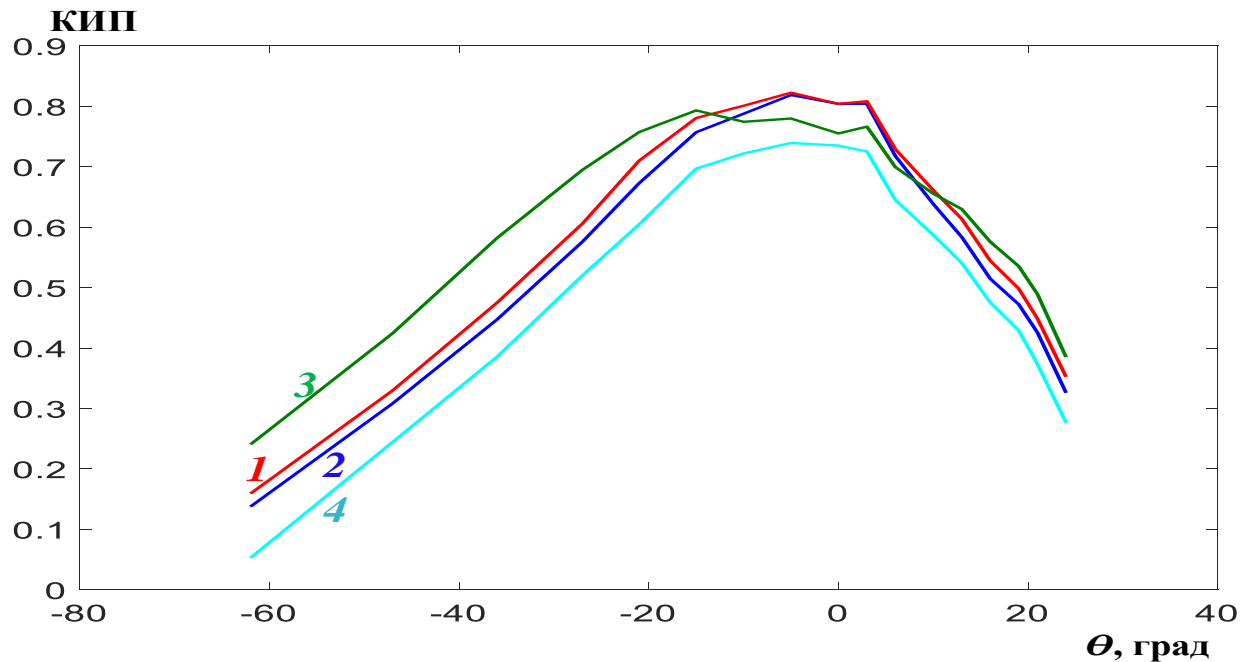


Рис. 10. Зависимости величины КИП от угла места (1- трехфокальная двухзеркальная, 2 - трехфокальная зеркально-линзовая, 3 - бифокальная двухзеркальная, 4 – бифокальная однозеркальная).

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Максимальный угол зрения (сектор азимутального сканирования) обеспечивают трехфокальные волноводно-щелевые антенные решетки, минимальный - бифокальная однозеркальная.
2. Максимальный сектор частотного сканирования имеет волноводно-щелевая антенная решетка с бифокальной двухзеркальной диаграммо-образующей системой, минимальный - бифокальная однозеркальная антенная решетка.
3. У трехфокальной трехслойной двухзеркальной антенной решетки несколько шире угол зрения и сектор частотного сканирования по сравнению с зеркально-линзовой, однако у последней - более простая конструкция (двухслойная).

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

Литература

1. Калошин В.А., “Многолучевые гибридные антенны” // Труды 13-й Междун. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Crimico-2003, Сентябрь, 2003, г. Севастополь. С.383.
2. Ettorre M., Gandini E., Sauleau R. Multi-beam pillbox antennas in the millimeter-wave range // Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP) 2011. Rome. P. 2947.
3. Банков С.Е., Грачев Г.Г., Дуепенкова М.Д., Фролова Е.В. Проектирование и экспериментальное исследование интегральной зеркальной многолучевой антенны миллиметрового диапазона // РЭ. 2014. Т. 59 № 6. С. 55.
4. Tekkouk K., Ettorre M., Sauleau R., Casaletti M. Compact multi-beam Rotman lens antenna in SIW technology // IEEE Antennas and Propagation Society Intern.Symp. (APS/URSI). Chicago. USA. 2012. P. 2979.
5. Калошин В.А., Фролова Е.В., “Анализ и минимизация аберраций в широкоугольных планарных зеркальных системах” // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.pdf>
6. Венецкий А.С., Калошин В.А. Аберрации эйконала в планарных двухзеркальных антеннах // РЭ. 2014. Т. 59. № 11. С. 1102.
7. Банков С.Е., Фролова Е.В. Проектирование и экспериментальное исследование планарной многолучевой двухзеркальной апланатической системы // РЭ. 2017. Т.62. № 5. С. 463.
8. Калошин В.А., Ле Д.Т. Синтез и анализ бифокальных двухзеркальных систем // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/13/text.pdf>
9. Венецкий А.С., Калошин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной трехзеркальной системы // Журнал радиоэлектроники. 2018. №1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/4/text.pdf>

10. Калошин В.А., Нгием Х.Д., Фролова Е.В. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной волноводной трехфокальной зеркально-линзовой системы с принудительным преломлением // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf>

11. Калошин В.А., Нгием Х.Д., “Синтез и анализ диэлектрических бифокальных линз” // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 8. URL <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/17/text.pdf>

12. Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е.В. Бифокальная планарная волноводно-щелевая решетка // РЭ. 2019. Т. 64. № 8. С. 768.

13. 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. 2020. № 3. URL <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/13/text.pdf>

14. Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е.В. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. URL <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/9/text.pdf>

Для цитирования:

Калошин В.А., Ле Д.Т. Трехфокальные волноводно-щелевые антенные решётки. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/4/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.4

MULTI-BEAM THREE-FOCAL WAVEGUIDE-SLOT ANTENNA ARRAYS

Kaloshin V.A.¹, Le D.T.²

¹Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Mokhovaya 11-7, Moscow 125009, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

1. Kaloshin V.A. Multi-beam hybrid antennas. *Proceedings of 13 International Crimea Conference “SVCh tekhnika I telekommunikatsionnyye tekhnologii” [Microwave Engineering and Telecommunication Technologies]. Crimico-2003*. September 2003. Sebastopol. P. 383. (In Russian)
2. Ettorre M., Gandini E., Sauleau R. Multi-beam pillbox antennas in the millimeter-wave range. *Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP)*. 2011. Rome. P. 2947.
3. Bankov S.E., Grachve G.G., Duplenkova M.D., Frolova E.V. Design and experimental investigation of a multibeam integrated reflector antenna of the millimeter wave band. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2014. Vol.59. No.6. P.504-522. DOI [10.1134/S1064226914060059](https://doi.org/10.1134/S1064226914060059)
4. Tekkouk K., Ettorre M., Sauleau R., Casaletti M. Compact multi-beam Rotman lens antenna in SIW technology. *IEEE Antennas and Propagation Society Intern.Symp. (APS/URSI)*. Chicago. USA. 2012. P. 2979.
5. Kaloshin V.A., Frolova E.V. Analysis and minimization of aberration in wide-angle planar mirror systems. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2014. No.1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.pdf>
6. Venetskiy A.S., Kaloshin V.A. Eikonal aberrations in planar double-reflector antennas. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2014. Vol. 59. No.11. P. 1147-1154. DOI [10.1134/S1064226914100088](https://doi.org/10.1134/S1064226914100088)
7. Design and experimental study of a planar multibeam double-reflector aplanatic system. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017. Vol. 62. No. 5. P. 489-495. DOI [10.1134/S1064226917050023](https://doi.org/10.1134/S1064226917050023)
8. Kaloshin V.A., Le. D.T. Synthesis and analysis of bifocal two-mirror systems. // *Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics*. 2018. No. 9. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/13/text.pdf> DOI [10.30898/1684-1719.2018.9.13](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.13)
9. Venetskiy A.S., Kaloshin V.A., Nguyen K.T., Frolova E.V. Synthesis and study of ultra-wideband planar three-mirror system. *Zhurnal Radioelektroniki - Journal*

of *Radio Electronics*. 2018. No. 1. Available at

<http://jre.cplire.ru/jre/jan18/4/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719-2018-1-5](https://doi.org/10.30898/1684-1719-2018-1-5)

10. Kaloshin V.A., Ngiyem H.D., Frolova E.V. Synthesis and investigation of an ultra-

wideband planar waveguide three-focal constrained lens-mirror system. *Zhurnal*

Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2018. No. 1. Available at

<http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719-2018-1-4](https://doi.org/10.30898/1684-1719-2018-1-4)

11. Kaloshin V.A., Nghiem H.D. **Synthesis and analysis of dielectric bifocal lenses.** //

Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2018. No. 8. Available

at <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/17/text.pdf> DOI [10.30898/1684-1719.2018.8.17](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.17)

12. Kaloshin V.A., Le D.T., Frolova E.V. Bifocal Planar Slotted-Waveguide Antenna

Array. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019. Vol.64.

No.8. P.756-762. DOI [10.1134/S106422691907009X](https://doi.org/10.1134/S106422691907009X)

13. Kaloshin V.A., Le D.T., Vi. U.N. Multi-beam waveguide-slot antenna arrays with

bifocal beam-forming systems and wide frequency scanning sector. *Zhurnal*

Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics. 2020. No. 3. Available

at <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/13/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2020.3.13](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.3.13)

14. Kaloshin V.A., Le D.T., Frolova E.V. Waveguide slot antenna with wide

frequency scanning sector. *Journal of Radio Electronics*. 2020. No. 3. Available

at <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/9/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2020.3.9](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.3.9)

For citation:

Kaloshin V.A., Le D.T. Multi-beam three-focal waveguide-slot antenna arrays. *Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics*. 2020. No. 4. Available at <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/4/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2020.4.4](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.4)