

DOI 10.30898/1684-1719.2020.3.13

УДК 621.396.67

МНОГОЛУЧЕВЫЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ С БИФОКАЛЬНЫМИ ДИАГРАММО-ОБРАЗУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ И ШИРОКИМ СЕКТОРОМ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В. А. Калошин¹, Д. Т. Ле², У. Н. Ви²

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

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

Статья поступила в редакцию 16 марта 2020 г.

Аннотация. Решена задача синтеза бифокальной зеркально-линзовой системы, преобразующей две расходящиеся цилиндрические волны - в плоские. Проведен анализ aberrаций синтезированной бифокальной системы. С использованием электродинамического моделирования на основе метода конечных элементов исследована многолучевая волноводно-щелевая антенная решетка с широким сектором частотного сканирования и двумя типами бифокальных диаграммо-образующих систем: двухзеркальной и зеркально-линзовой. В качестве элемента решетки использована волноводно-щелевая антенна с четырьмя продольными щелями на периоде.

Ключевые слова: многолучевая решетка, бифокальная диаграммо-образующая система, волноводно-щелевая антенна, частотное сканирование.

Abstract. The problem of the synthesis of a bifocal mirror-lens system that converts two diverging cylindrical waves into plane waves has been solved. The analysis of aberrations of the synthesized bifocal system is carried out. Using electrodynamic modeling based on the finite element method, a multi-beam waveguide-slot antenna array with a wide sector of frequency scanning and two types of bifocal beam-forming systems - two-mirror and mirror-lens is studied. A linear waveguide-slot antenna with four longitudinal slots per period was used as an element of the array.

Key words: multi-beam array, bifocal beam-forming system, waveguide-slot antenna, frequency scanning.

Введение. В последнее десятилетие одним из интенсивно развивающихся направлений исследований является разработка и исследование планарных сканирующих и многолучевых антенных решеток [1-8]. Для формирования многолучевой диаграммы направленности в них используется диаграммообразующая система (ДОС) на основе планарного волновода с расположенными в волноводе облучателями. Над планарным волноводом расположена антенная решетка. В случае использования волноводно-щелевой антенной решетки появляется возможность частотного сканирования многолучевой диаграммы направленности.

В простейшем случае конструкция антенной решетки содержит два слоя, связанных параболической щелью или системой отверстий, которые замыкаются параболическим зеркалом [2, 3]. Однако система с параболическим зеркалом не может обеспечить широкоугольную многолучевую диаграмму из-за aberrаций, возникающих при смещении облучателя из фокуса параболы. Для уменьшения aberrаций при сканировании луча в работе [1] использована бифокальная зеркально-линзовая система на основе волноводной линзы, в работах [4-8] – трехфокальная система на основе линзы Ротмана. В работе [9] предложена и исследована бифокальная волноводно-щелевая антенная решетка на основе простой двухслойной конструкции с эллиптическим зеркалом.

В работах Б.Е. Кинберас соавторами [9 - 11] была предложена методика решения задачи синтеза двухзеркальной системы, преобразующей две расходящиеся цилиндрические волны в сходящиеся или плоские. Методика основана на задании начального участка поверхности одного из зеркал и последовательного нахождения других участков этого и другого зеркала. Для получения гладкого решения в указанных работах приведены условия сопряжения

с требованием непрерывности функций, описывающих участки поверхности, а также их производных на границах участков. Однако приведенных в указанных работах условий недостаточно для получения корректного решения задачи геометрооптического синтеза. Кроме того, в этих работах отсутствует ответ на вопрос о выборе начального участка.

В работе [12] была предложена методика синтеза бифокальной двухзеркальной системы, центральные участки зеркал которой выбраны из условия непрерывности поверхности зеркала на границах участков, а также первой и второй производных на их границах. Был проведен анализ аберраций синтезированных систем.

В данной работе исследована многолучевая трехслойная волноводно-щелевая антенная решетка бифокальной двухзеркальной ДОС, синтезированной в работе [12]. Кроме того, проведен синтез и анализ аберраций бифокальной зеркально-линзовой ДОС и многолучевой двухслойной волноводно-щелевой антенной решетки на ее основе. В качестве элемента решетки в обоих случаях используется линейная волноводно-щелевая антенна, предложенная и исследованная в работе [13].

1. Синтез и анализ бифокальной зеркально-линзовой системы

Рассмотрим, прежде всего, двумерную задачу синтеза бифокальной зеркально-линзовой системы, с одной стороны которой расположены два симметричных относительно оси y фокуса F_1 и F_2 (рис. 1). С другой стороны системы формируются два плоских волновых фронта.

Зададим начальный участок входной поверхности линзы в виде функции $f_{11}(-x_0 \leq x \leq x_0)$ с производной $f'_{11}(-x_0 \leq x \leq x_0)$ и начальный участок зеркала в виде функции $f_{21}(x)$ с производной $f'_{21}(x)$. Начальный участок зеркала пересекает ось Oy в начале координат $O(0,0)$, толщина линзы в центре равна d_{Len} .

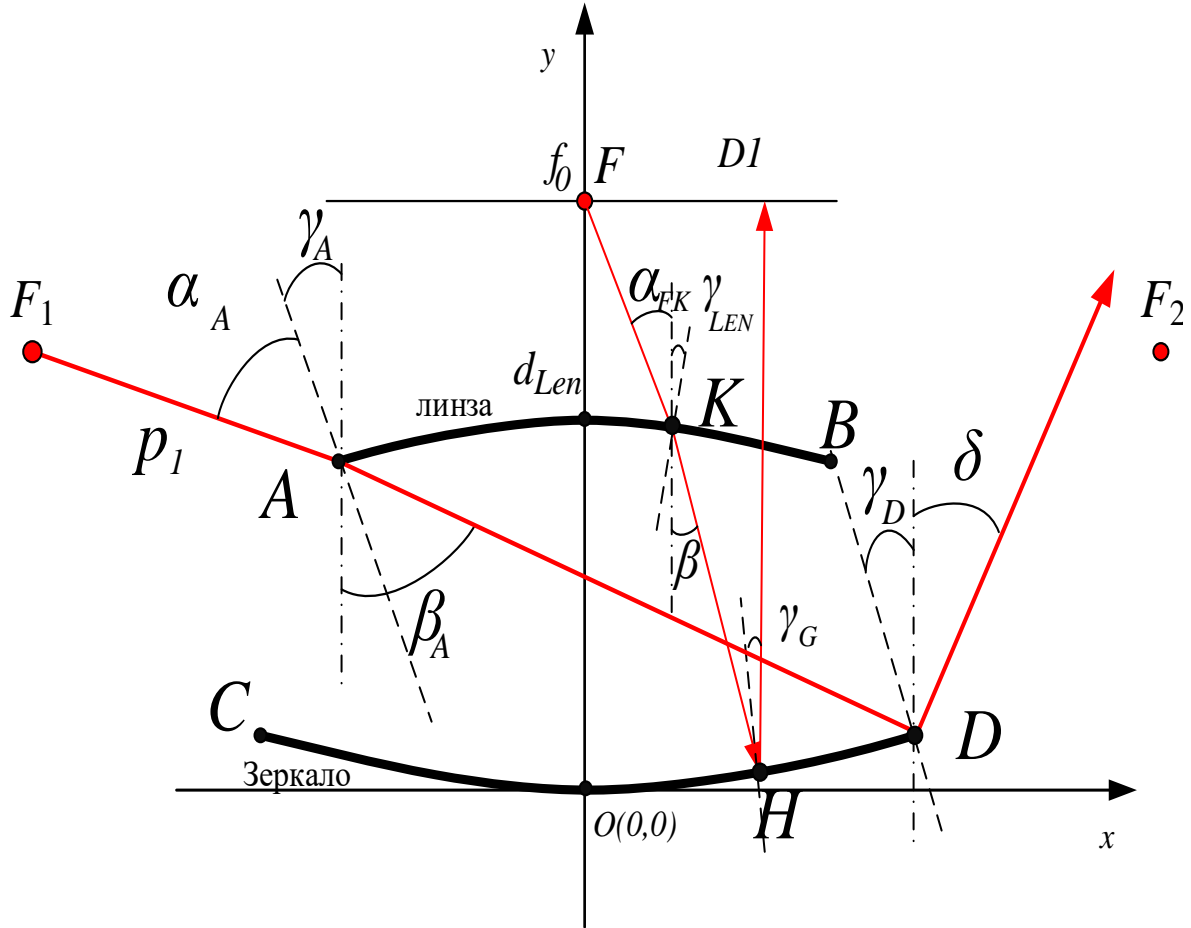


Рис. 1. Бифокальная зеркально-линзовая система.

Предположим, что из точки $F(0, f_0)$ луч падает вдоль оси y (далее центральный луч), проходит через линзу и отражается от зеркала. Электрическая длина пути (эйконал) этого луча равна $L_0 = 2f_0 + d_{Len}(n - 1)$. Другой луч из точки F преломляется линзой в точке $K(x_K, y_{Len_K})$, падает на зеркало в точке $H(x_H, y_{G_H})$ и отражается от него. Эйконал луча $L = FK + nKH + dH / D_1$. Чтобы волна на выходе была плоской, эйконалы всех лучей должны быть равны, т. е. $L = L_0$.

$$FK + nKH + dH / D_1 = 2f_0 + d_{Len}(n - 1) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sqrt{(x_K)^2 + (f_0 - y_{Len_K})^2} + nKH + f_0 - (x_K - KH \cos(\beta_{KH})) = 2f_0 + d_{Len}(n-1)$$

Данное уравнение имеет решение для длины отрезка KH в виде

$$KH = \frac{L_0 + d - f_0 - \sqrt{(x_K)^2 + (f_0 - y_K)^2}}{n + \cos(\beta_{KH})}$$

Величины x_H и y_{G_H} находим по формулам

$$\begin{aligned} x_H &= x_K + \frac{L_0 + d - f_0 - \sqrt{(x_K)^2 + (f_0 - y_K)^2}}{n + \cos(\beta_{KH})} \sin(\beta_{KH}) \\ y_{G_H} &= y_{Len_K} - \frac{L_0 + d - f_0 - \sqrt{(x_K)^2 + (f_0 - y_K)^2}}{n + \cos(\beta_{KH})} \cos(\beta_{KH}) \end{aligned} \quad (1)$$

Из закона преломления получаем:

$$\sin(\alpha_{FK} + \gamma_{Len}) = n \sin(\beta_{KH} + \gamma_{Len}) \Rightarrow \beta_{KH} = a \sin(\sin(\alpha_{FK} + \gamma_{Len}) / n) - \gamma_{Len} \quad (2)$$

Из уравнения (2), получаем:

$$n \cdot \sin(\beta_{KH} + \gamma_G) = \sin(\gamma_G) \Rightarrow y'_H = \tan(\gamma_G) = \frac{\sin(\gamma_G)}{\cos(\gamma_G)} = \frac{n \sin(\beta_{KH})}{1 + n \cos(\beta_{KH})} \quad (3)$$

Теперь определим положение фокусов системы, чтобы луч из фокуса F_1 попал в левый край начального отрезка, прошел через линзу, попал в правой край зеркала и отразился от него под углом δ (рис. 1).

Из геометрии лучей и законов отражения и преломления нетрудно определить координаты фокусов

$$\begin{aligned} x_{F1} &= x_A - p_1 \sin(\alpha_A) \\ y_{F1} &= y_A + p_1 \cos(\alpha_A) \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_A = \gamma + a \sin(\sin(\beta_A - \gamma_A))$; $\gamma_A = a \tan(y'_A)$; $\beta_A = a \tan((x_D - x_A)/(x_A - x_D))$

Угол выхода луча определяется формулой:

$$\delta = a \sin(n \sin(\beta_A + \gamma_D)) + \gamma_D \quad (5)$$

где $\gamma_D = a \tan(y'_D)$.

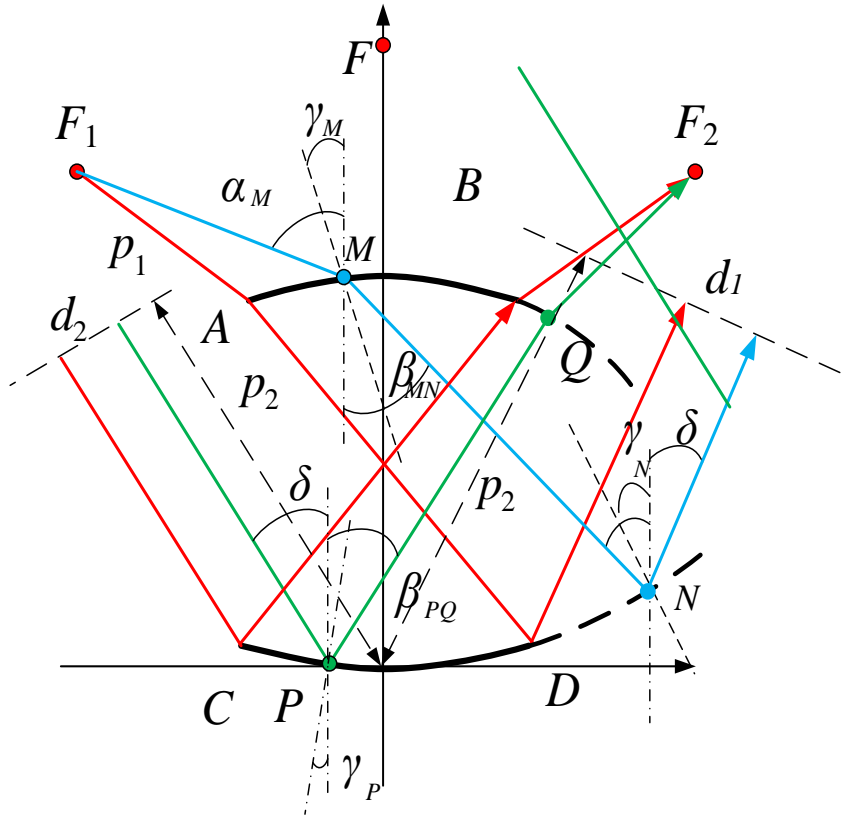


Рис. 2. К определению новых участков зеркала и линзы.

Пусть далее луч из фокуса F_1 попадает на линзу в точке A , проходит через линзу, падает на зеркало в точке D и отражается под углом δ . Эйконал этого луча до линии фронта равняется

$$R_0 = p_1 + nl_0 + p_2 - x_D \sin(\delta) - y_D \cos(\delta), \quad \text{где}$$

$$l_0 = \sqrt{(x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2}, \quad p_2 - \text{расстояние от фокуса до фронта } d_2.$$

Предложим, что луч из фокуса F_1 падает на линзу в точке M , которая лежит на начальном участке линзы, попадает на зеркало в точке N и отражается под углом δ (показан на рис. 2 синим цветом). Эйконал этого луча равняется $R_{MN} = F_1M + nl_{MN} + p_2 - x_N \sin(\delta) - y_N \cos(\delta)$.

Из геометрии на рис. 2 имеем:

$$\begin{aligned} x_N &= x_M + l_{MN} \sin(\beta_{MN}) \\ y_N &= y_M - l_{MN} \cos(\beta_{MN}) \\ \alpha_M &= a \tan((x_M - x_{F1}) / (y_{F1} - y_M)) \\ \gamma_M &= a \tan(y'_M) \end{aligned} \quad (6)$$

Из закона преломления для лучей в точке M получаем

$$\beta_{MN} = a \sin(\sin(\alpha_M - \gamma_M) / n) + \gamma_M$$

Чтобы на выходе системы волна была плоской, длины пути всех лучей до фронта волны должны быть одинаковыми, то есть $R_{MN} = R_0$. Решая это уравнение относительно l_{MN} , получим:

$$l_{MN} = \frac{R_0 - FM - p_2 + x_M \sin(\delta) + y_M \cos(\delta)}{n - \sin(\beta_{MN}) \sin(\delta) + \cos(\beta_{MN}) \cos(\delta)} \quad (7)$$

Поставляя (7) в (6), получаем координаты точки N . Меняя положение входных точек на линзе, получаем новый участок зеркала.

Из закона преломления и отражения для луча в точке N выразим значения первой производной поверхности линзы через тангенс угла γ_N .

$$y'_N = \tan(\gamma_N) = \frac{\sin(\gamma_N)}{\cos(\gamma_N)} = \frac{n \sin(\beta_{MN}) - \sin(\delta)}{n \cos(\beta_{MN}) + \cos(\delta)} \quad (8)$$

Для определения нового участка линзы рассмотрим луч плоской волны, которая попадает на первый участок зеркала в точке P под углом δ , отражается, проходит линзу и выходит из нее в точке Q (на рис. 2 этот луч показан зеленым цветом). Эйконал этого луча от фронта d_2 до фокуса F_2 $R_{PQ} = D_P + nl_{PQ} + QF_2$, где $D_P = p_2 - (0 - x_P) \sin(\delta) - y_P \cos(\delta)$. Для луча, который проходит через края первых отрезков, эйконал $R_0 = p_2 + x_C \sin(\delta) - y_C \cos(\delta) + nl_0 + p_1$. Чтобы все лучи попали в фокус, их эйконалы должны быть одинаковыми, то есть $R_{PQ} = R_0$. Решая данное уравнение относительно l_{PQ} , получим:

$$l_{PQ} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - A \cdot C}}{A} \quad (9)$$

где: $A = n^2 - 1$; $B = (x_{F_2} - x_P) \sin(\beta_{PQ}) + (y_{F_2} - y_P) \cos(\beta_{PQ}) + n(D_P - R_0)$;

$$C = (R_{0P} - D_P)^2 + (x_P - x_{F_2})^2 - (y_P - y_{F_2})^2; \beta_{PQ} = a \sin\left(\frac{\sin(\delta - \gamma_P)}{n}\right) - \gamma_P;$$

$$\gamma_P = a \tan(-y'_P);$$

Координаты точки Q нового отрезка линзы рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} x_Q &= x_P + l_{PQ} \sin(\beta_{PQ}) \\ y_Q &= y_P + l_{PQ} \cos(\beta_{PQ}) \end{aligned} \quad (10)$$

Из закона преломления находим первую производную нового участка линзы:

$$y'_Q = \frac{n \sin \beta_{PQ} - \sin \alpha_Q}{\cos \alpha_Q - n \cos \beta_{PQ}} \quad (11)$$

где $\sin \alpha_Q = a \tan((x_{F_2} - x_Q) / (y_{F_2} - y_Q))$.

Используя аналогичную методику, можно найти следующие отрезки линзы и зеркала. Алгоритм повторяем до тех пор, пока не получим требуемую апертуру системы или он начинает расходиться.

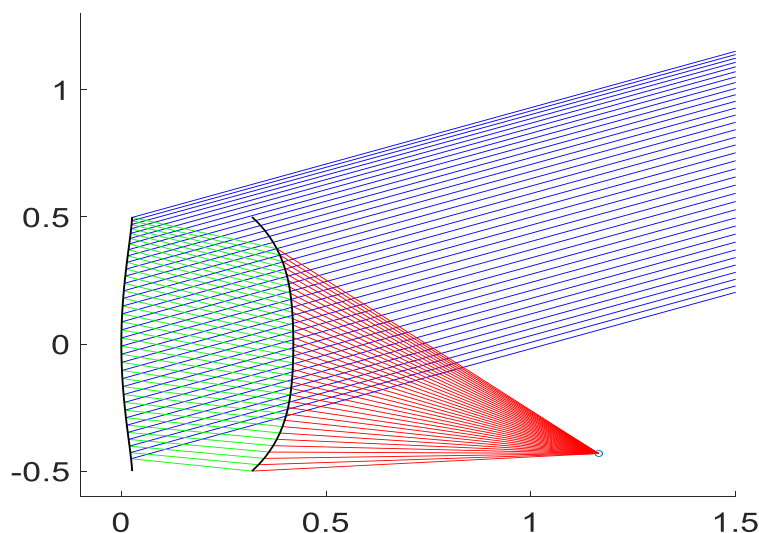
В качестве примера была синтезирована система с начальным участком линзы в виде параболы и следующими параметрами: $y = -0.15x^2 + 0.42$, $x_0 = 0.06$, $p_1 = 0.8325$, $p_2 = 3$, $f_0 = 1.4$, $n = \sqrt{2.2}$, $d_{Len} = 0.42$, $D = 1$.

Для анализа данной системы найдем нормированную среднеквадратическую aberrацию (СКА) эйконала на выходе систем по формуле:

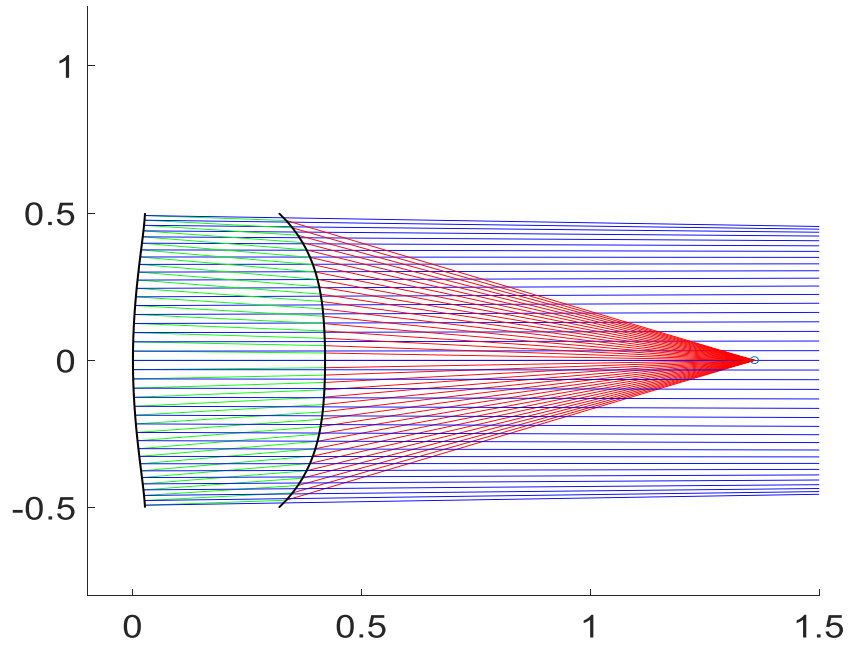
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - L_{cp})^2}$$

где L_i - длина оптического пути лучи с номером i ; L_{cp} - эйконал центрального луча; n - количество учтенных лучей.

На рис. 3 показана геометрия синтезированной зеркально-линзовой бифокальной системы и ход лучей в двух случаях положения источника: в точном фокусе (рис.3а) и при нахождении источника на линии симметрии системы (рис.3б).



а) источник в точном фокусе



б) источник в середине фокальной линии

Рис. 3. Геометрии бифокальной зеркально-линзовой системы.

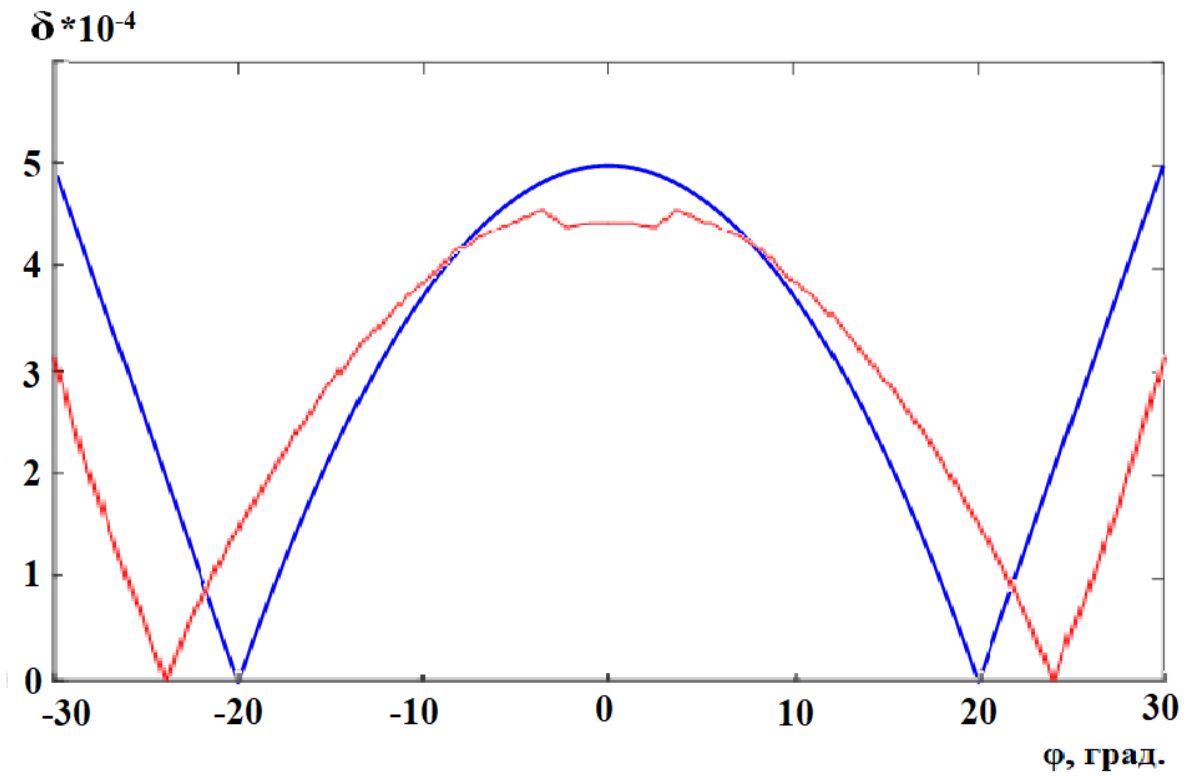


Рис. 4. Зависимость нормированной СКА от угла зрения.

На рисунке рис. 4 показаны зависимости величины нормированной СКА от угла зрения для бифокальной зеркально-линзовой системы (красная кривая) и для бифокальной двухзеркальной системы, синтезированной в работе [12] (синяя кривая). Как видно на рисунке, СКА в угле зрения 60^0 зеркально-линзовой ДОС немного меньше, чем двухзеркальной.

2. Волноводно-щелевая антенная решётка с бифокальной ДОС

На рис.5 показана конструкция планарной волноводно-щелевой трехслойной антенной решётки с двухзеркальной ДОС. Полотно решетки 200×172 мм, толщина слоев (планарных волноводов) $h = 1.6$ мм. Переходы между слоями выполнены в виде криволинейных щелей шириной $d_1 = d_2 = 1.1$ мм одинаковой формы с примыкающими к ним зеркалами. Возбудителями являются Н - секториальные рупоры с входным сечением 7.2×1.6 мм и выходным сечением 16×1.6 мм (на рисунке не показаны), расположенные на фокальной линии ДОС.

На рис. 6 показана конструкция планарной волноводно-щелевой антенной решётки 200×172 мм с толщиной слоев (планарных волноводов) $h = 1.6$ мм и зеркально-линзовой ДОС. Переходы между слоями выполнены в виде щелей шириной $d = 1.2$ мм одинаковой формы с примыкающими к ним зеркалами. Возбудителями являются Н - секториальные рупоры с входным сечением 7.2×1.6 мм и выходным сечением 21×1.6 мм (на рисунке не показаны), расположенные на фокальной линии ДОС. Как видно на рис.6, отличие этой конструкции от конструкции решётки с двухзеркальной ДОС (рис. 5) - отсутствие одного из слоев.

Полотно волноводно-щелевая антенная решётки состоит из 40 прямоугольных волноводов сечением 5×1.6 мм, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$, с четырьмя продольными щелями на широких стенках на каждом периоде и синусоидальным амплитудным распределением вытекающей моды вдоль волноводов решетки.

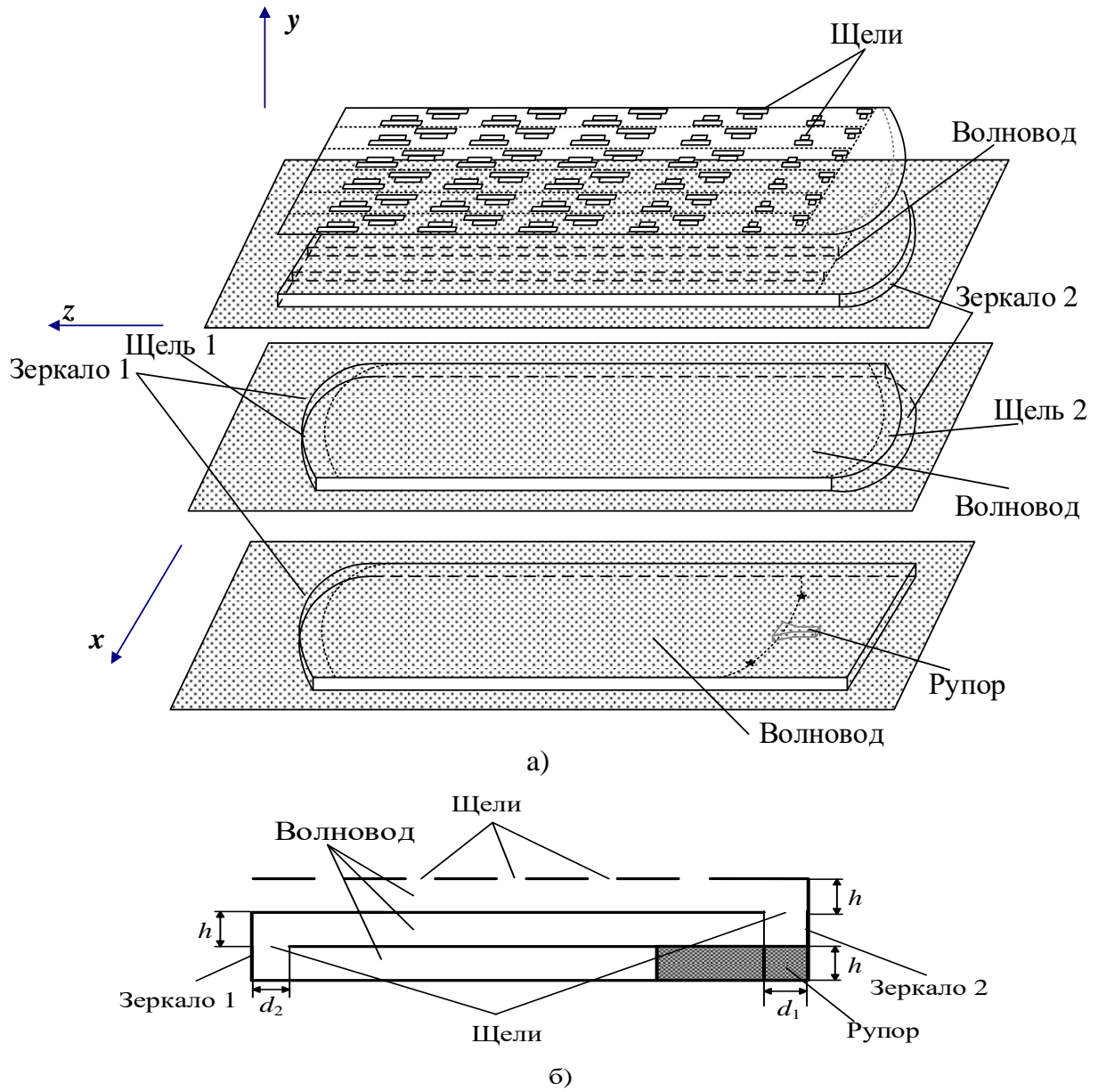


Рис. 5. Конструкция планарной волноводно-щелевой антенной решетки с двухзеркальной ДОР (а) – общий вид, (б) – сечение.

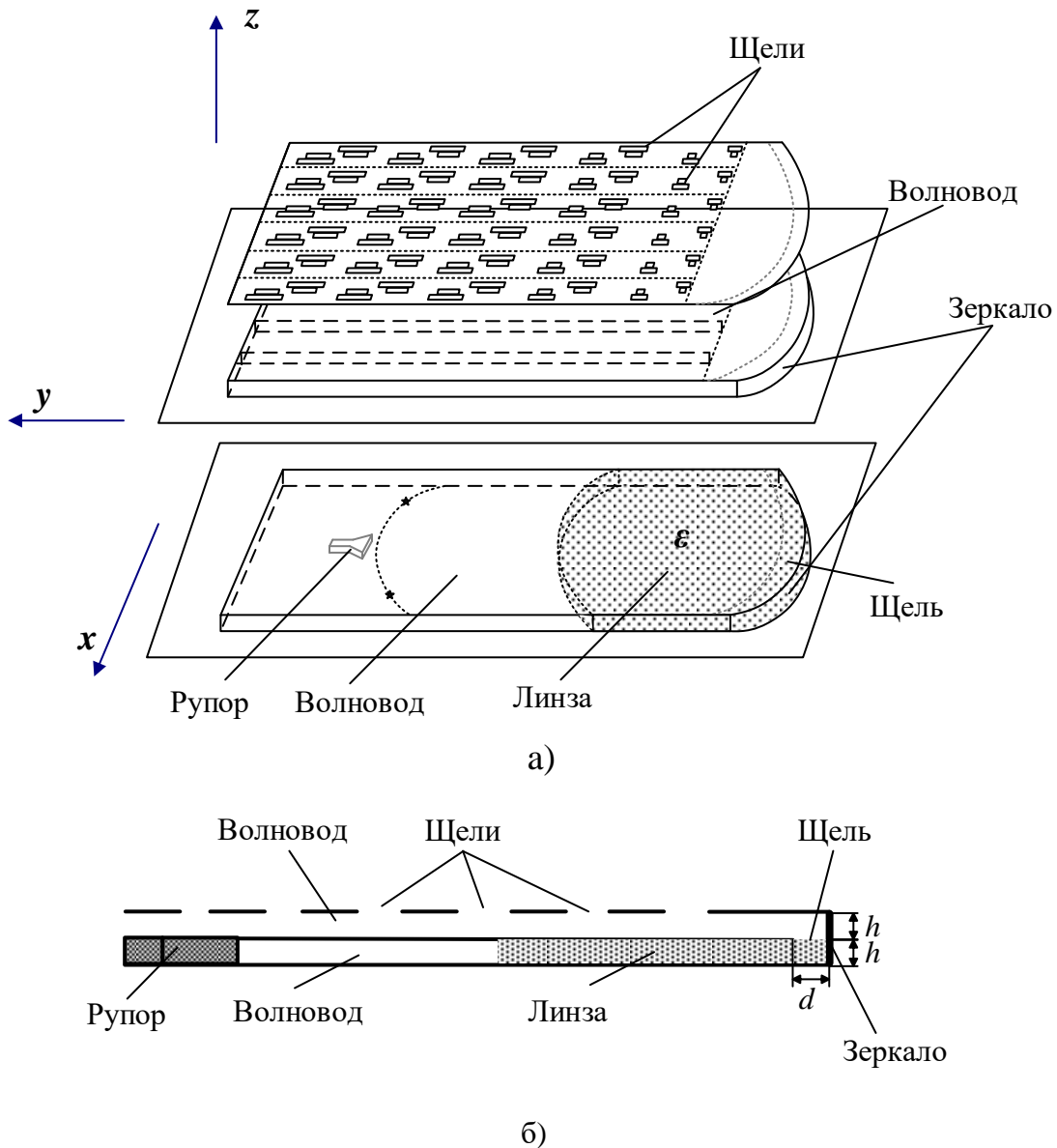


Рис. 6. Конструкция планарной волноводно-щелевой антенной решетке зеркально-линзовой ДОС (а) – общий вид, (б) – сечение.

На рис. 7 показаны диаграммы направленности (ДН) антенных решеток в азимутальной плоскости при перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой на частоте 30 ГГц (красная кривая- для зеркально-линзовой системы, синяя кривая- для бифокальной двухзеркальной системы). Расчеты проводились методом конечных элементов в среде Ansys HFSS

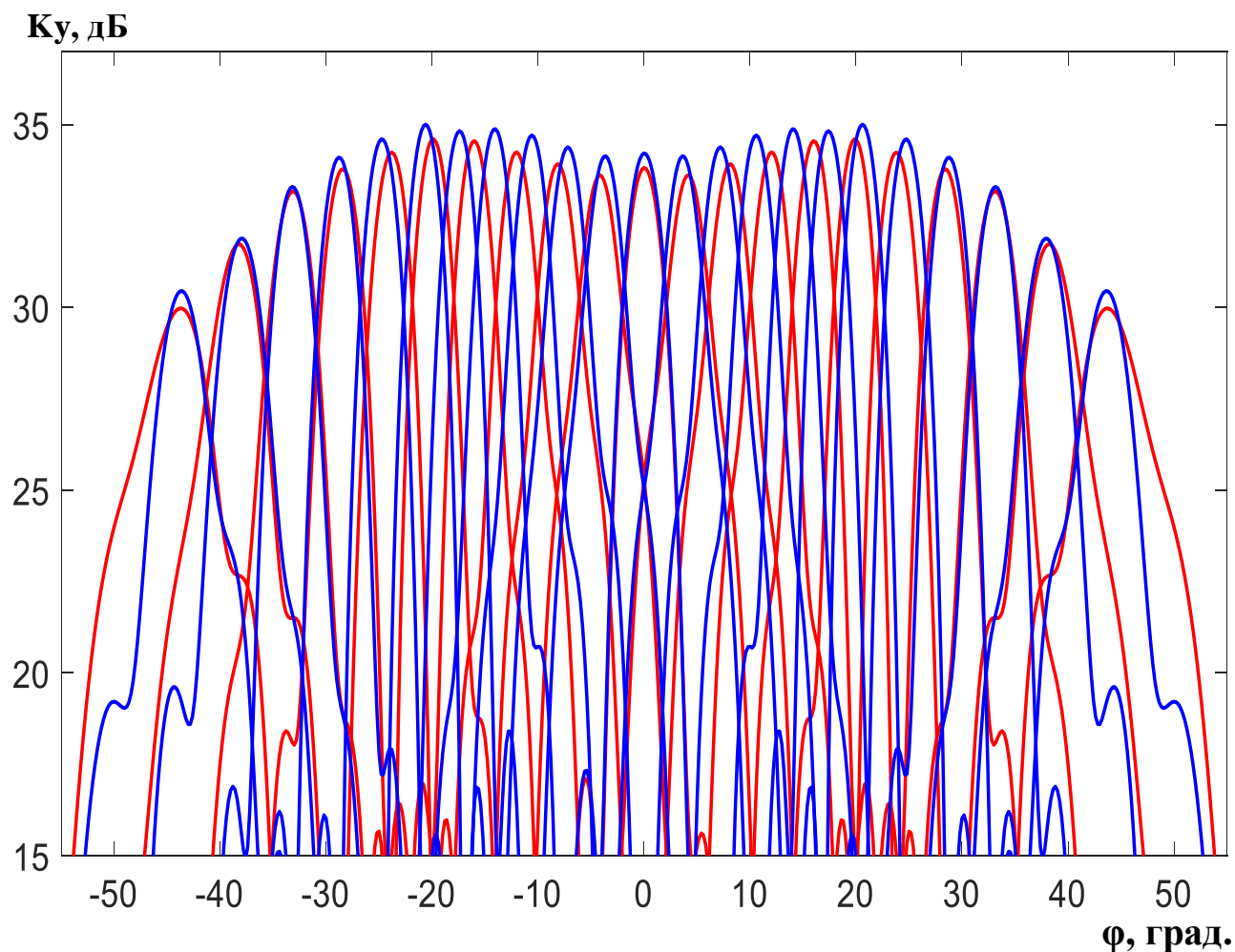


Рис. 7. Диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости.

На рис. 8. показаны диаграммы направленности (ДН) антенных решеток в угломестной плоскости при изменении частоты от 22ГГц до 38ГГц и центральном положении облучателя (красная кривая - для зеркально-линзовой ДОС, синяя кривая- для двухзеркальной ДОС).

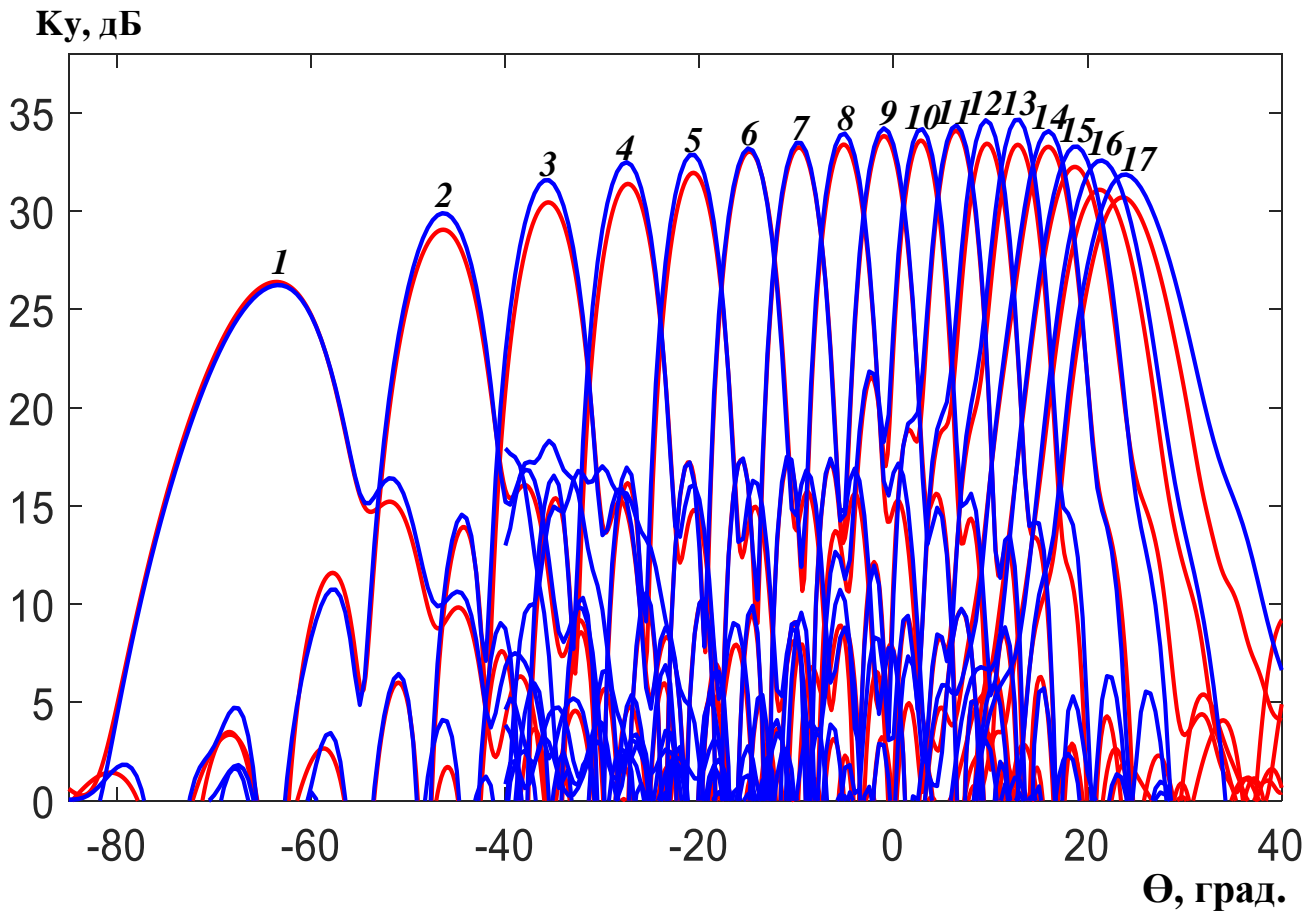


Рис. 8. Диаграммы направленности в угломестной плоскости в зависимости от частоты: 1 – 22ГГц, 2 - 23ГГц, 3 - 24ГГц, 4 - 25ГГц, 5 - 26ГГц, 6 - 27ГГц, 7 - 28ГГц, 8 - 29ГГц, 9 - 30ГГц, 10 - 31ГГц, 11 - 32ГГц, 12 - 33ГГц, 13 - 34ГГц, 14 - 35ГГц, 15 - 36ГГц, 16 - 37ГГц, 17 - 38ГГц.

На рис. 9 приведены зависимости коэффициента использования поверхности антенны (КИП) в азимутальной плоскости при перемещении рупорного облучателя по фокальной кривой на частоте 30 ГГц (кривая 1 - для двухзеркальной ДОС, 2 - для зеркально-линзовой ДОС) и в угломестной плоскости при изменении частоты от 22 до 38 ГГц и центральном положении облучателя (кривая 3 - для двухзеркальной ДОС, 4 - для зеркально-линзовой ДОС).

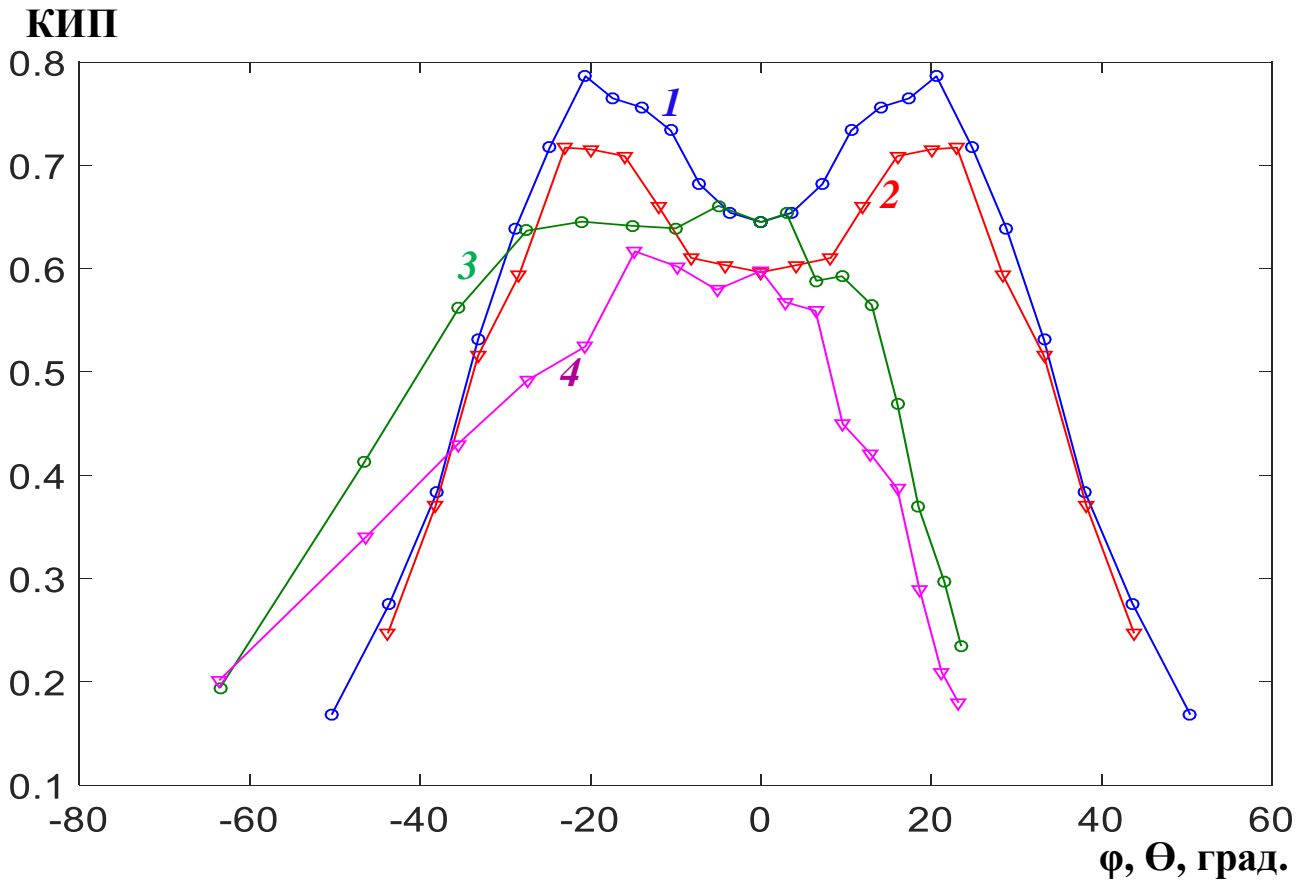


Рис. 9. Зависимости КИПа в азимутальной и угломерной плоскостях.

Как видно на рис.9, по уровню КИПа 0.5 сектора частотного сканирования в угломерной плоскости антенной решетки с двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС равны, соответственно, 58° и 40° . При этом углы зрения многолучевой диаграммы в азимутальной плоскости для этих решеток почти одинаковы и примерно равны 72° .

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Аберрационные свойства и, соответственно, углы зрения многолучевых диаграмм направленности антенных решеток с двухзеркальной и зеркально-линзовой ДОС близки.

2. Несмотря на использование одного и того же полотна, сектор частотного сканирования решетки с двухзеркальной ДОС больше, чем с зеркально-линзовой, что объясняется меньшим коэффициентом усиления последней.
3. Количество лучей многолучевой диаграммы направленности в приближении одного сканирующего рупора определялось путем сдвига луча на угол, соответствующий угловому размеру рупора. Более точно это количество можно определить, учитывая взаимное влияние рупоров в облучающей системе.

Литература

1. Калошин В.А. Многолучевые гибридные антенны // Труды 13 Междун. Крымской конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Crimico-2003, Сентябрь 2003. г. Севастополь. С.383.
2. Mauro Ettore, Erio Gandini, Ronan Sauleau. 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., Дупленкова 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., Ettore 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. Karim Tekkouk, Mauro Ettore, Laurent Le Coq and Ronan Sauleau. Multibeam SIW slotted waveguide antenna system fed by a compact dual-layer Rotman lens // IEEE Trans. on Antennas and Propag. 2015. V.64. №2. P. 504.
6. Toan K. Vo Dai, Tuan Nguyen, OzlemKilic. A compact microstrip Rotman lens design // IEEE International Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI. 2017. San Diego. USA. P. 2129.

7. Yi Liu, Hu Yang, Zusheng Jin, Jiang Zhu. A multi-beam cylindrically conformal slot array antenna based on a modified Rotman lens // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V.66. №7. P. 3441.
8. Шишлов А.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи // Журнал радиоэлектроники. 2018. №7. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> DOI [10.30898/1684-1719.2018.7.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.7.6)
9. Калошин В.А., Ле Д.Т., Фролова Е. В. Бифокальная планарная волноводно-щелевая решётка // РЭ. 2019. Т. 64. № 8. С. 768 – 774.
10. Кинбер Б.Е., Классен В.И., Стеблин В.И. К теории бифокальных систем // В кн.: Волны и диффракция. М.: ИРЭ АН СССР. — 1981. — С. 101-104.
11. Классен В.И., Кинбер Б.Е., Шишлов А.В., Тоболев А.К. Гибридные и полифокальные антенны. Обзор // Антенны. 1987. Вып. 34. С. 3-24.
12. Калошин В.А., Ле Д.Т. Синтез и анализ бифокальных двухзеркальных систем // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 9. <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)
13. В.А. Калошин, Д.Т.Ле, Е.В. Фролова. Волноводно-щелевая антенна с широким сектором частотного сканирования // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. URL <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)

Для цитирования:

Калошин В.А., Ле Д.Т., Ви У.Н. Многолучевые волноводно-щелевые антенные решетки с бифокальными диаграммо-образующими системами и широким сектором частотного сканирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №3. Режим доступа: <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)