

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЛАНАРНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ ТРЕХФОКАЛЬНОЙ ЛИНЗО-ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ПРЕЛОМЛЕНИЕМ

В. А. Калошин, Х. Д. Нгием, Е. В. Фролова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2017 г.

Аннотация. Проведен синтез трехфокальной линзо-зеркальной системы с принудительным преломлением цилиндрической симметрии. В результате оптимизации параметров реализован сектор сканирования ± 60 градусов. Результаты эксперимента подтвердили величину сектора сканирования и широкополосные свойства многолучевой планарной антенны на базе синтезированной трехфокальной системы.

Ключевые слова: антенны, сверхширокополосные, многолучевые, зеркальные, линза с принудительным преломлением, планарные.

Abstract. The paper considers a two-floor waveguide three-focal mirror-lens system. In the first part of the paper, problems of synthesis and minimization of aberrations of a three-focal two-dimensional constrained lens with the same length of lines connecting the input and output surfaces of the lens are considered. The aberrations of the synthesized three-focal lens-mirror system are compared with the aberrations of the three-focal lenses Ruze and Rotman, synthesized for angles of 60 and 120 degrees. In the second part of the work, an analysis of the broadband and scanning properties of a planar two-floor multi-beam antenna based on the synthesized system was carried out. The results of the experiment at three frequencies of 45, 60 and 75 GHz confirm the broadband properties of the antenna, which are provided by an identical length of the waveguides of the synthesized three-focal lens-mirror system. The scanning properties of the antenna are confirmed by the results of the experiment for beams that are deflected by 30 and 60 degrees.

Keywords: antennas, ultra-wideband, multi-beam, mirror, constrained lens, planar.

Цилиндрическая бифокальная линза - зеркальная система на основе регулярных волноводов, облучающая многолучевую антенную решетку, рассмотрена в работе [1]. При этом планарный волновод, в котором располагается облучающая система, делает 180-градусный разворот и образует двухэтажную конструкцию, второй этаж которой занимает решетка. Такая конструкция более компактна по сравнению с одноэтажной, в которой в качестве фокусирующего элемента обычно используется трехфокальная линза Ротмана [2]. В работе [3] рассмотрена трехэтажная система с двухэтажной линзой Ротмана. Однако такая конструкция более громоздкая, чем двухэтажная. Кроме того, требование обеспечения широкой полосы частот приводит к необходимости использования в линзе Ротмана полосковых или коаксиальных линий, что, в свою очередь, приводит к усложнению конструкции и увеличению потерь по сравнению с волноводным вариантом. В данной работе рассматривается двухэтажная волноводная трехфокальная система. В первой части работы рассмотрены задачи синтеза и минимизации aberrаций трехфокальной зеркально-линзовой цилиндрической системы, а во второй - проведен анализ сканирующих свойств планарной многолучевой антенны на основе синтезированной системы. Широкополосные свойства антенны обеспечиваются одинаковой длиной волноводов синтезированной трехфокальной линзы – зеркальной системы.

Рассмотрим задачи синтеза и минимизации aberrаций цилиндрической трехфокальной линзы - зеркальной системы. Предварительно решим задачу синтеза трехфокальной линзы с принудительным преломлением и линиями одинаковой длины, которая преобразует цилиндрический фронт источника с центром в одной из трех точек (точка F, F_1, F_2 в декартовой системе координат на рис.1) в соответствующий плоский фронт.

Из условия синфазности для всех лучей, выходящих из фокуса F должно выполняться следующее равенство:

$$\sqrt{y_1^2 + (f + z_1)^2} = f + z_2; \quad (1)$$

а для лучей, выходящих из фокуса F_1 - равенство:

$$\sqrt{(f_1 \sin \alpha + y_1)^2 + (f_1 \cos \alpha + z_1)^2} = f_1 + y_2 \sin \alpha + z_2 \cos \alpha; \quad (2)$$

Аналогично для лучей, выходящих из фокуса F_2 ,

$$\sqrt{(f_1 \sin \alpha - y_1)^2 + (f_1 \cos \alpha + z_1)^2} = f_1 - y_2 \sin \alpha + z_2 \cos \alpha; \quad (3)$$

Возводя обе части уравнения (2) в квадрат, получаем:

$$\begin{aligned} f_1^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 + 2y_1 f_1 \sin \alpha + 2z_1 f_1 \cos \alpha = \\ = (f_1 + z_2 \cos \alpha)^2 + y_2^2 \sin^2 \alpha + 2y_2 \sin \alpha (f_1 + z_2 \cos \alpha); \end{aligned} \quad (4)$$

Возводя обе части уравнения (3) в квадрат, получаем:

$$\begin{aligned} f_1^2 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - 2y_1 f_1 \sin \alpha + 2z_1 f_1 \cos \alpha = \\ = (f_1 + z_2 \cos \alpha)^2 + y_2^2 \sin^2 \alpha - 2y_2 \sin \alpha (f_1 + z_2 \cos \alpha); \end{aligned} \quad (5)$$

Вычитая (5) из (4), получаем:

$$f_1 + z_2 \cos \alpha = y_1 f_1 / y_2; \quad (6)$$

Из (1) получаем:

$$y_1 = \sqrt{(f + z_2)^2 - (f + z_1)^2}; \quad (7)$$

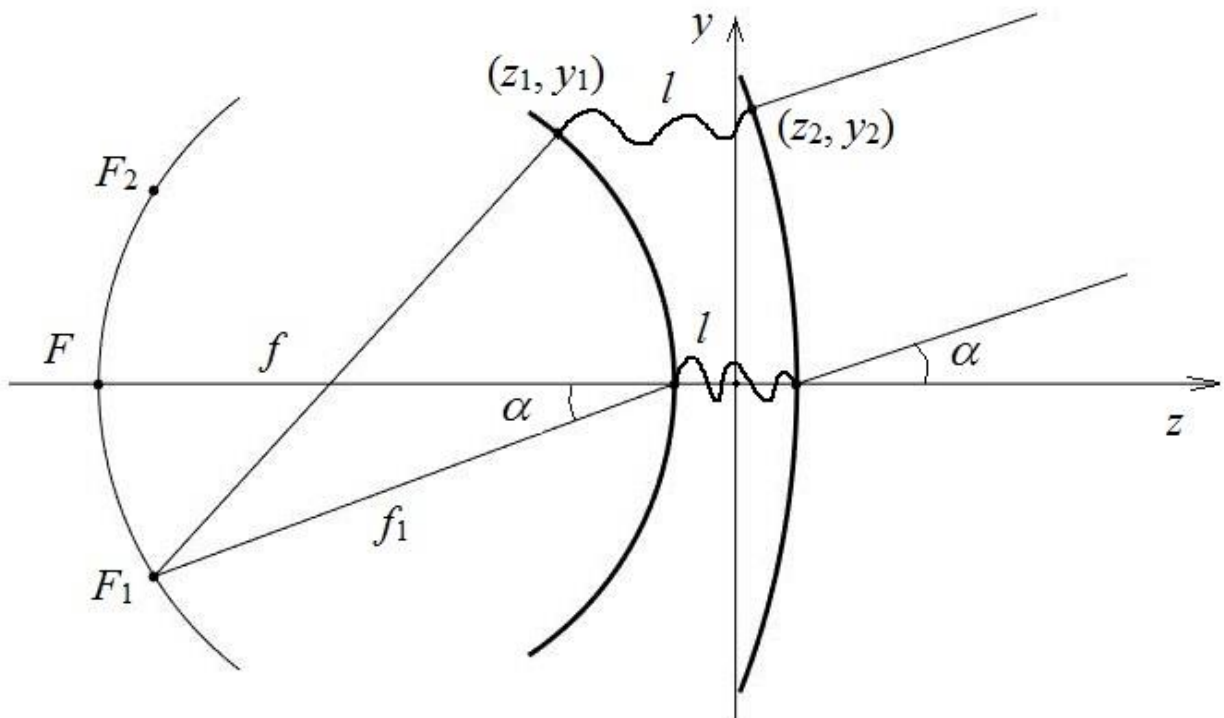


Рис.1. Трехфокальная линза

Отсюда, получаем:

$$y_2 = f_1 \sqrt{(f + z_2)^2 - (f + z_1)^2} / (f_1 + z_2 \cos \alpha); \quad (8)$$

Подставляем y_1 , y_2 из (7) и (8) и перепишем относительно переменной z_1 , получаем:

$$Az_1^2 + Bz_1 + C = 0; \quad (9)$$

где $A = f_1^2 \sin^2 \alpha / (f_1 + z_2 \cos \alpha)^2$;

$$B = 2f_1 \cos \alpha - 2f \left(1 - f_1^2 \sin^2 \alpha / (f_1 + z_2 \cos \alpha)^2 \right);$$

$$C = f_1^2 - f^2 + (f + z_2)^2 - (f_1 + z_2 \cos \alpha)^2 + f_1^2 \sin^2 \alpha \frac{f^2 - (f + z_2)^2}{(f_1 + z_2 \cos \alpha)^2}.$$

Уравнение (9) имеет два решения:

$$z_1 = \left(-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC} \right) / 2A; \quad (10)$$

Задавая z_2 , определяем z_1 из (10); затем определяем y_1 и y_2 по формулам (7) и (8) соответственно.

В качестве примера была синтезирована линза со следующими значениями параметров: $f=1$; величина апертуры $D=1$; продольный размер (толщина) линзы на оси системы $2z_0=0.2$.

Для анализа качества синтеза вычислялась среднеквадратическая абберрация эйконала на выходе линзы (СКА):

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - L_0)^2} / N; \quad (11)$$

где L_i – длина оптического пути от источника через линию с номером i ; L_0 – длина оптического пути из источника через центральную линию; N – число линий в линзе.

Значения угла α и f_1 выберем так, чтобы среднеквадратичная абберрация в заданном угле зрения была наименьшей. Ограничиваясь фокальными кривыми в виде окружностей, проходящих через точки F, F_1, F_2 , будем минимизировать СКА для двух углов зрения: 60° и 120° . В результате для угла зрения 60°

получаем оптимальные значения параметров α и f_2 : $\alpha=26.5^\circ$; $f_2 = 0.8953$, а для угла зрения 120° : $\alpha=56.5^\circ$; $f_2 = 0.6213$.

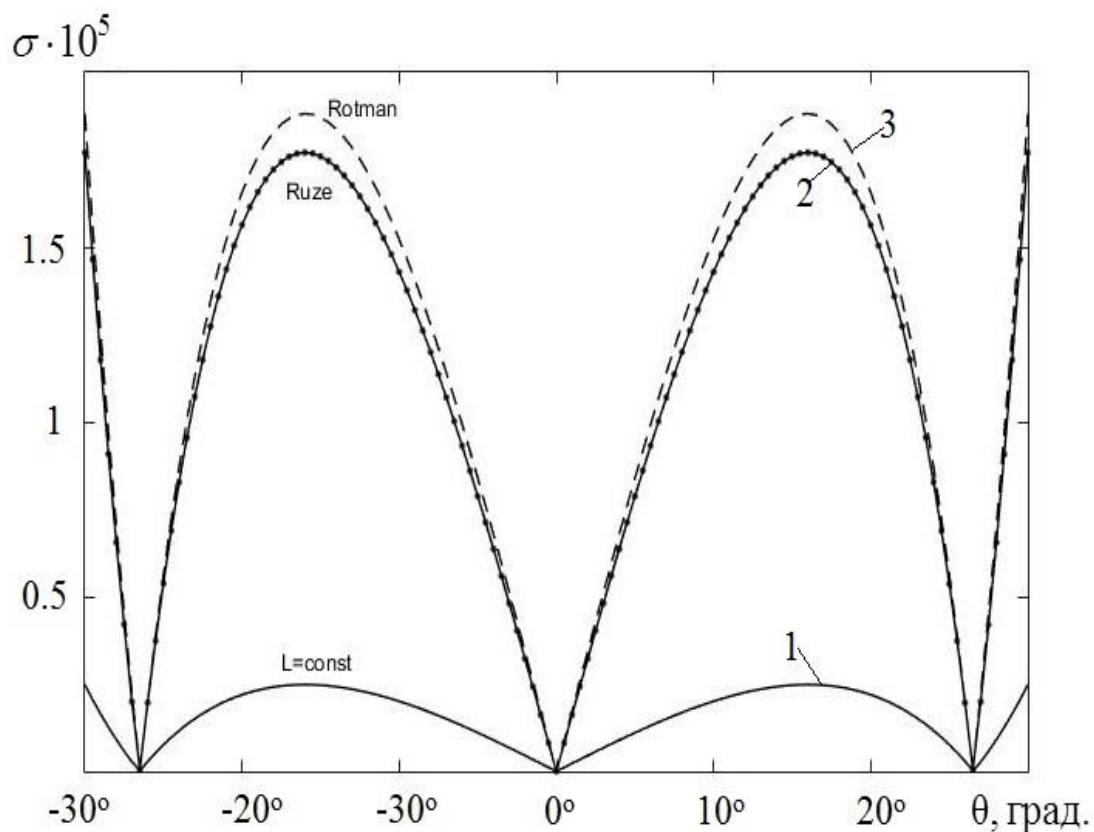


Рис.2. Аберрации в линзе с углом зрения 60 градусов

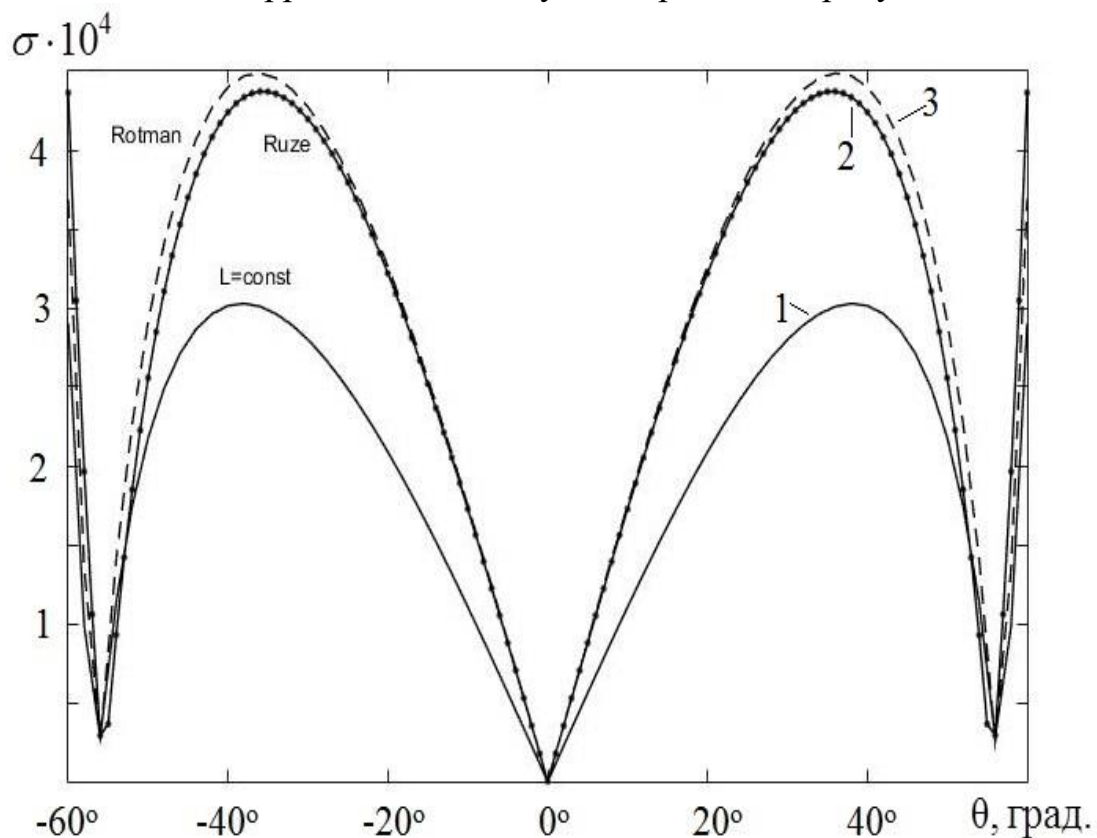


Рис.3. Аберрации в линзе с углом зрения 120 градусов

На рис.2. кривой 1 приведена зависимость среднеквадратической aberrации от угла зрения линзы с одинаковой длиной линий, синтезированной выше для угла зрения 60 градусов. Для сравнения кривыми 2,3 приведены аналогичные зависимости для трехфокальных линз Рузе [4] и Ротмана [5]. На рис.3 в аналогичных обозначениях показаны соответствующие зависимости для линз, синтезированных для угла зрения 120 градусов. На рисунках видно, что линзы с одинаковой длиной линий обеспечивают существенно меньшую величину среднеквадратической aberrации.

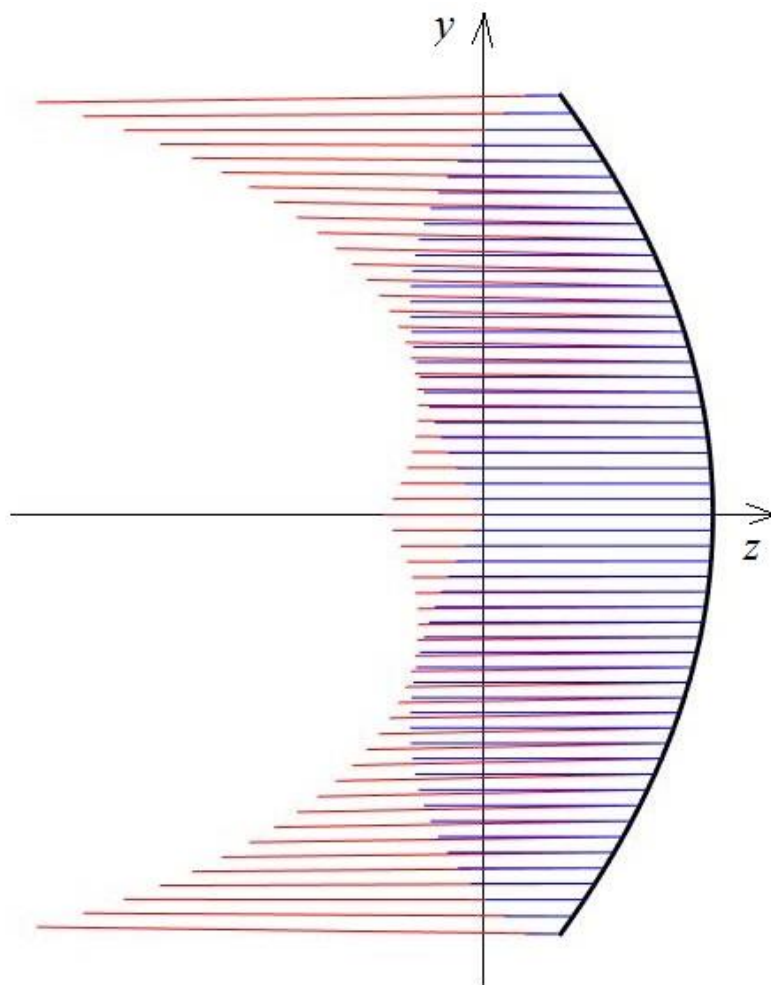


Рис. 4. Линзо-зеркальная трехфокальная система

Для обеспечения одинаковой длины линий при переменном расстоянии между входной и выходной поверхностью линзы можно использовать либо изогнутые линии в виде меандра (рис.1), либо линии с разным коэффициентом замедления. В случае линзо-зеркальной системы конструкция линзы

упрощается из-за того, что линии можно делать прямыми, поскольку их длину можно регулировать формой зеркала. На рис.4. показан вариант линзо-зеркальной системы, являющийся аналогом линзы, синтезированной выше для угла зрения 120 градусов.

Красными линиями показаны волноводы линзы на первом слое антенны, а синими – на втором. Конструктивно зеркало образовано 180 градусными волноводными разворотами, расположенными в соответствующих точках. Излучаясь из Н-секториального рупора на первом слое антенны, цилиндрическая волна, пройдя через волноводные развороты фокусируется, переходит на второй слой и излучается в свободное пространство из открытого конца планарного волновода, расширенного в виде рупора в Е-плоскости. Отметим, что волноводы первого слоя не параллельны друг другу. Это обеспечивает реализацию необходимой функции отображения $y_2(y_1)$. Конструктивно это обеспечивается за счет изменения толщины стенок.

На рис.5 черной, синей и красной кривыми показаны диаграммы направленности в Е- плоскости центрального луча антенны, соответственно, для частоты 45, 60 и 75 ГГц.

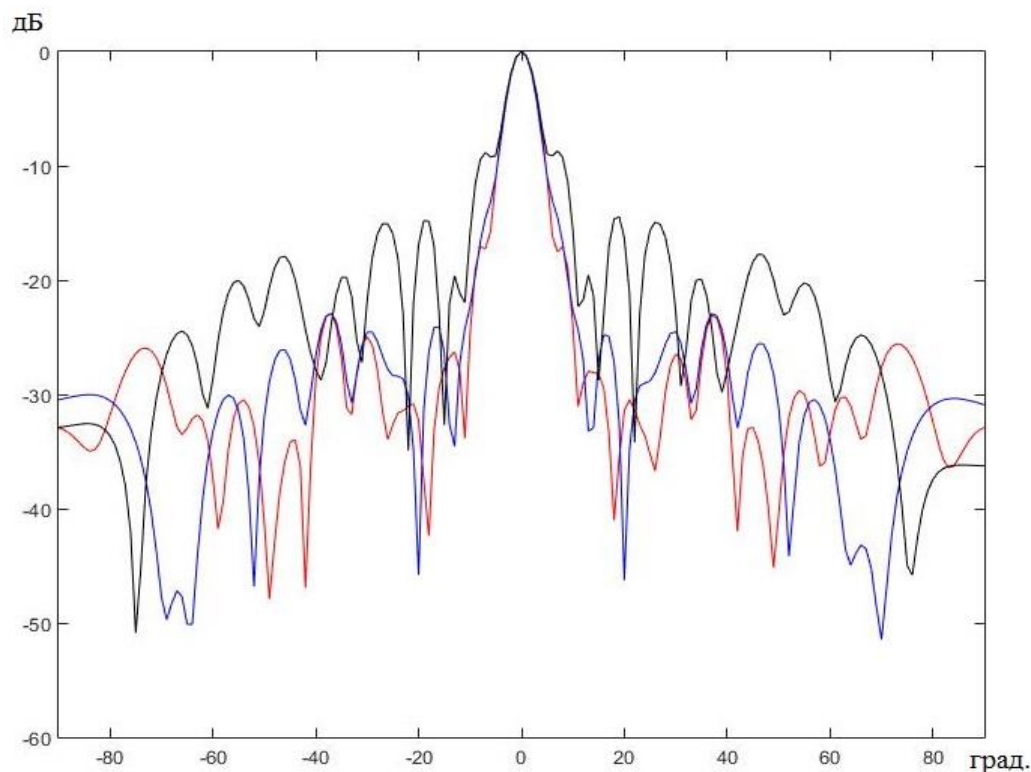


Рис.5. Диаграммы направленности центрального луча на трех частотах

Следует отметить стабильную ширину главного лепестка во всем частотном диапазоне, что обеспечивает стабильный уровень пересечения соседних лучей многолучевой антенны.

На рис.6 теми же цветами показаны диаграммы направленности антенны в Е- плоскости на частоте 60 ГГц в режиме сканирования.

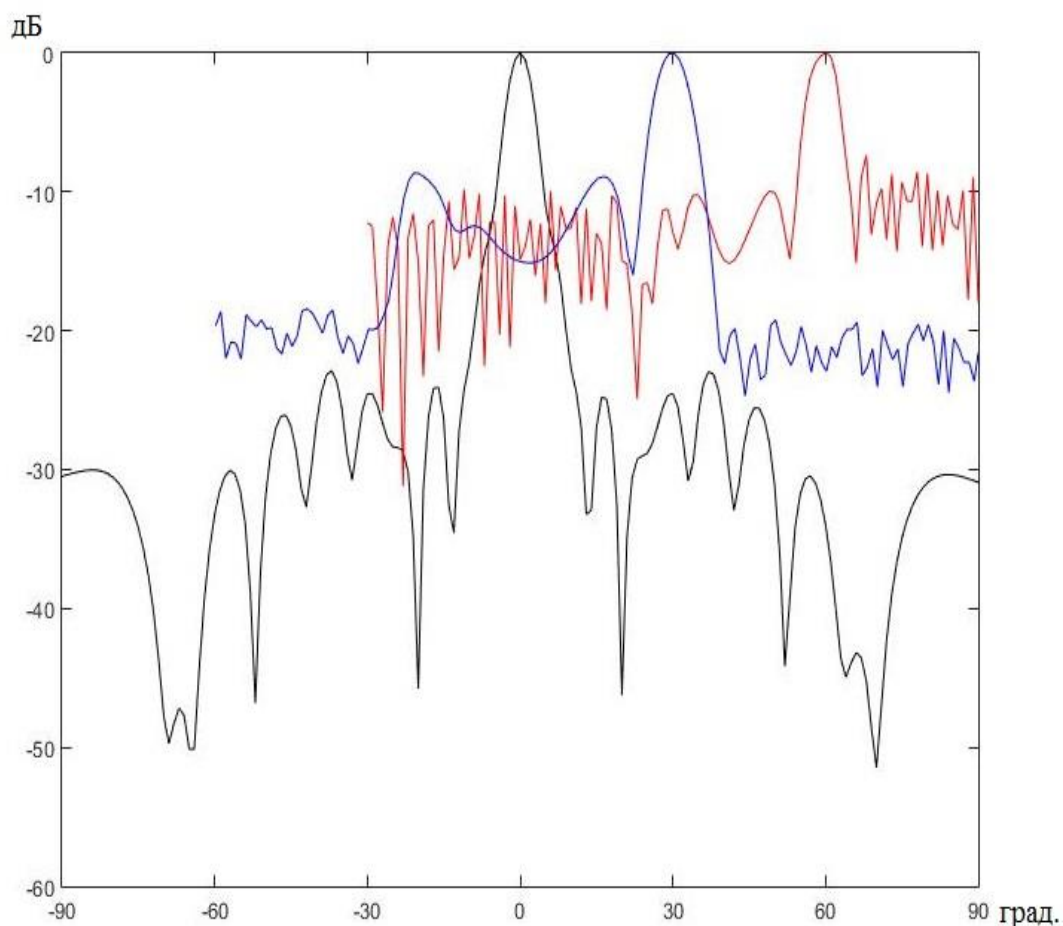


Рис.6. Диаграммы направленности при сканировании

Полученные результаты подтверждают величину сектора сканирования и широкополосные свойства многолучевой антенны на базе синтезированной линзо-зеркальной системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-07-07797

Литература

1. В.А.Калошин. Многолучевые гибридные антенны // Труды 13 Междун. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Crimico-2003», г. Севастополь, сентябрь 2003 г., с.383-390.
2. Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai and others, Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, V.56, № 8, pp.2504-2513.
3. K. Tekkouk, M. Ettore, L. Le Coq, R. Sauleau. Multibeam SIW Slotted Waveguide Antenna System Fed by a Compact Dual-Layer Rotman Lens, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016, V. 64, №2, pp. 504–514.
4. J. Ruse. // Proc. IRE. 1950. V. 38. № 1. P. 53.
5. W. Rotman, R. F. Turner. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1963. V. AP-11. № 6. P. 623.

Для цитирования:

В. А. Калошин, Х. Д. Нгием, Е. В. Фролова. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной волноводной трехфокальной линзо-зеркальной системы с принудительным преломлением. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/3/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-4