

# РАДИООБЪЕКТИВ С ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ РЕШЁТКИ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ

В. А. Калошин, Е. В. Фролова

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

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2018 г.

**Аннотация.** Исследованы характеристики частотного и фазового сканирования решетки металлических волноводов, заполненных диэлектриком, с парными продольными щелями, сфокусированной в зоне Френеля. Показана возможность подавления побочных интерференционных максимумов за счет заполнения волноводов диэлектриком.

**Ключевые слова:** волноводно-щелевая решетка, волновод, заполненный диэлектриком, фокусировка в зоне Френеля, частотно-фазовое сканирование

**Abstract.** In this paper the results of synthesis and analysis of a two-dimensional array of leaky wave waveguides filled with a dielectric, focused in the Fresnel zone are presented. As radiators, pairwise longitudinal rectangular slots in wide walls of waveguides, shifted by half the wavelength in the waveguide at the central frequency of the band are selected. The problem of determining the position of the slots for focusing the field at a finite distance from the plane of the lattice is solved. Using the finite element method, numerical simulation of the array radiation in the frequency-phase scanning mode is performed. The shape of the focal surface in frequency and phase scanning and the directional characteristics of focused beams in the Fresnel zone are investigated. A comparison with the previously studied array of hollow waveguides is made, the possibility of suppressing the side interference maxima is shown.

**Key words:** waveguide-slotted array, waveguide filled with a dielectric, focusing in the Fresnel zone, frequency-phase scanning.

## Введение

Сфокусированные в зоне Френеля зеркальные и линзовые системы, а также антенные решётки в настоящее время используются в качестве радиообъективов систем ближнего радиовидения, в том числе для целей безопасности, биомедицинской диагностики, контроля материалов, в системах для СВЧ нагрева и передачи мощности, RFID и т.д. [1-6].

Среди сфокусированных в зоне Френеля антенных решёток следует выделить решетки с частотным и частотно-фазовым сканированием, относящиеся к антеннам вытекающей волны [8-13]. Излучающие структуры с частотным сканированием не содержат управляемых или активных элементов и поэтому они сочетают низкую стоимость с возможностью электрического сканирования за счет изменения частоты сигнала. Системы с частотно-фазовым сканированием [7, 13-15] содержат линейку фазовращателей.

Для фокусировки излучения в зоне Френеля используются различные типы антенн вытекающей волны: на основе радиальной линии [7], криволинейного волновода [8], нерегулярного волновода с переменной фазовой скоростью вытекающей моды [10,11], волноводов с переменным периодом излучающих неоднородностей [12,13]. Режим частотного сканирования исследовался в работах [10,11] для случая линейной антенны вытекающей волны в виде волновода с непрерывной щелью переменной ширины, в работах [12, 13] - для случая сфокусированной двумерной волноводно-щелевой решётки с дискретными парными продольными щелями в широких стенках волноводов.

Волноводно-щелевые решётки с непериодическим расположением щелей вдоль волноводов могут использоваться для двумерного частотно-фазового сканирования в зоне Френеля [13] так же, как антенные решётки с периодическими щелями в дальней зоне [14, 15]. Однако, как показано в [13], применение волноводов с воздушным заполнением в сфокусированных решётках, как и в периодических, приводит к нарушению однолучевого режима излучения и возникновению побочных интерференционных лучей. Хотя уровень этих лучей в сфокусированных решётках меньше, чем в периодических,

при больших фазовых сдвигах он становится соизмерим с уровнем главного луча. Следует заметить, что в отличие от дальней зоны, где частотно-фазовое сканирование в волноводно-щелевой решётке можно считать двумерным, при изменении частоты излучения и сдвига фаз на входах волноводов сфокусированной решётки сканирование в зоне Френеля является трёхмерным, так как область фокусировки является поверхностью, точки которой характеризуются как угловыми координатами  $\theta$ ,  $\varphi$ , так и радиальным расстоянием от центра решётки  $r$ . При этом в плоскости, ориентированной параллельно волноводам (продольной) перемещение фокального пятна происходит за счет частотного сканирования. В плоскости ортогональной осям волноводов (поперечной) обзор пространства может осуществляться разными способами: при помощи фазовращателей в волноводах, многолучевой диаграммообразующей схемы и т.д. В любом случае они приводят к возбуждению мод в волноводах решетки с заданным амплитудно-фазовым распределением. Продольную и поперечную плоскости, проходящие через центр решетки, в дальнейшем будем называть главными. В данной работе представлены результаты синтеза и анализа сфокусированной в зоне Френеля двумерной решетки регулярных волноводов вытекающей волны, заполненных диэлектриком. В качестве излучателей выбраны парные продольные прямоугольные щели в широких стенках волноводов, сдвинутые на половину длины волны в волноводе на центральной частоте диапазона. Решена задача определения положения щелей для фокусировки поля на конечном расстоянии от плоскости решетки. Выполнено численное моделирование излучения решётки в режиме частотно-фазового сканирования. Исследована форма фокальной поверхности при сканировании и характеристики направленности сфокусированных лучей в зоне Френеля. Проведено сравнение с ранее исследованной решёткой полых волноводов, показана возможность подавления побочных интерференционных максимумов.

## Исследование характеристик сфокусированной волноводно-щелевой решётки

В качестве модели для исследования характеристик сфокусированного пучка рассматривалась решетка, изображённая на рис.1, состоящая из семи металлических волноводов, заполненных диэлектриком с проницаемостью  $\varepsilon=2.2$ .

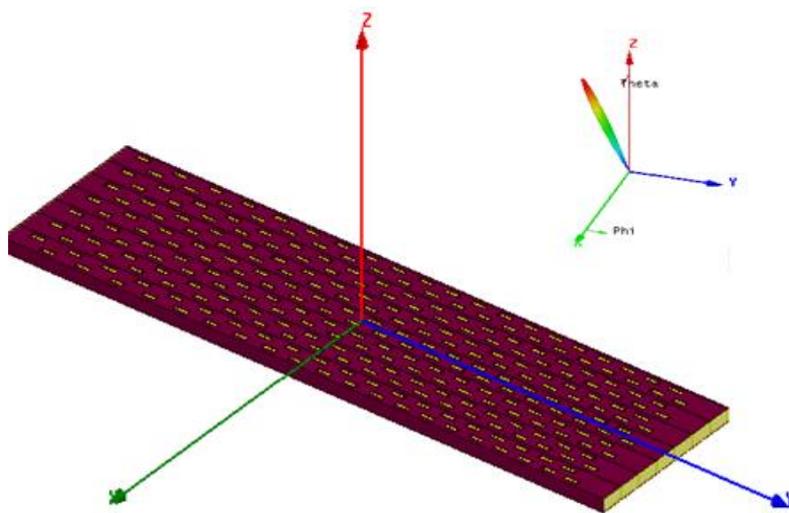


Рис. 1. Решётка волноводов, заполненных диэлектриком.

В каждом из волноводов решётки расположены два ряда из 20 продольных щелей размером 9.5x1.5 мм, смещенных относительно средней линии волновода на четверть размера широкой стенки. Размер поперечного сечения волноводов 15.51x6.74 мм, размер решетки 110x420 мм. Синтез решетки выполнен при условии расположения точки фокусировки на расстоянии  $R_f=450$  мм под углом  $\theta_f = -25^\circ$  от нормали к плоскости решетки на центральной частоте диапазона сканирования  $f=10$  ГГц. При синтезе положения щелей в волноводах фазовая постоянная  $\beta$  волноводной моды в первом приближении полагался равной фазовой постоянной невозмущенного волновода без щелей. Закон распределения щелей определялся аналогично [12] и представлен на рис. 2 в сравнение с зависимостью расстояния между щелями в решётке на полых волноводах с эквивалентными параметрами [13]. Как видно

на рисунке, расстояние между соседними щелями в волноводах с диэлектриком уменьшается в направлении распространения волны в волноводе и в рассматриваемой решётке меняется от 26.5 мм до 16.5 мм. Пространственное сканирование или изменение локализации сфокусированного излучения в зоне Френеля решётки осуществляется по двум направлениям: в продольном направлении решетки (вдоль оси  $Y$ ) за счёт изменения частоты (частотное сканирование) и в поперечном направлении (вдоль оси  $X$ ) за счёт изменения сдвига фазы между входами соседних волноводов решётки (фазовое сканирование). Для сканирования в поперечном направлении полагаем, что линейный фазовый фронт на входах волноводов создаётся либо фазовращателями, либо многолучевой диаграммообразующей схемой. В последнем случае aberrациями фазы на входах волноводов на данном этапе исследования мы пренебрегаем.

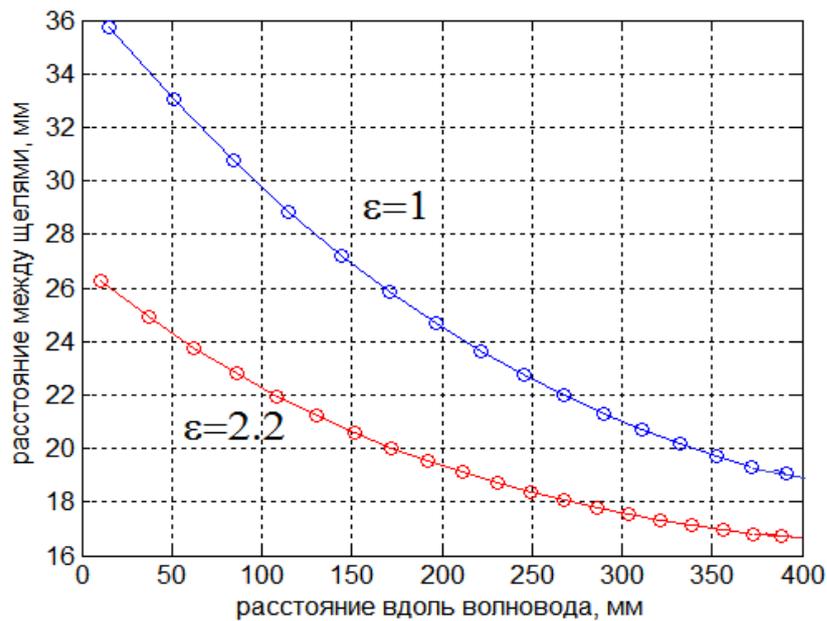


Рис. 2. Зависимость расстояния между щелями от координаты вдоль волноводов в решетках полых волноводах ( $\epsilon=1$ ) и волноводах с диэлектрическим заполнением ( $\epsilon=2.2$ ).

Таким образом, задача исследования характеристик сканирования неперриодической сфокусированной решётки сводится к определению пространственных координат центра фокального пятна в области максимальной

концентрации поля и распределения поля в пространстве при изменении частоты и сдвига фаз между волноводами в заданных диапазонах изменения этих величин.

Ниже приведены характеристики излучения решётки в области фокусировки, полученные при численном моделировании с использованием метода конечных элементов.

На рис. 3. приведено угловое распределение амплитуды поля в области фокусировки в плоскости  $ZOY$  на окружности, проходящей через центр фокального пятна на центральной частоте  $f_0=10$  ГГц.

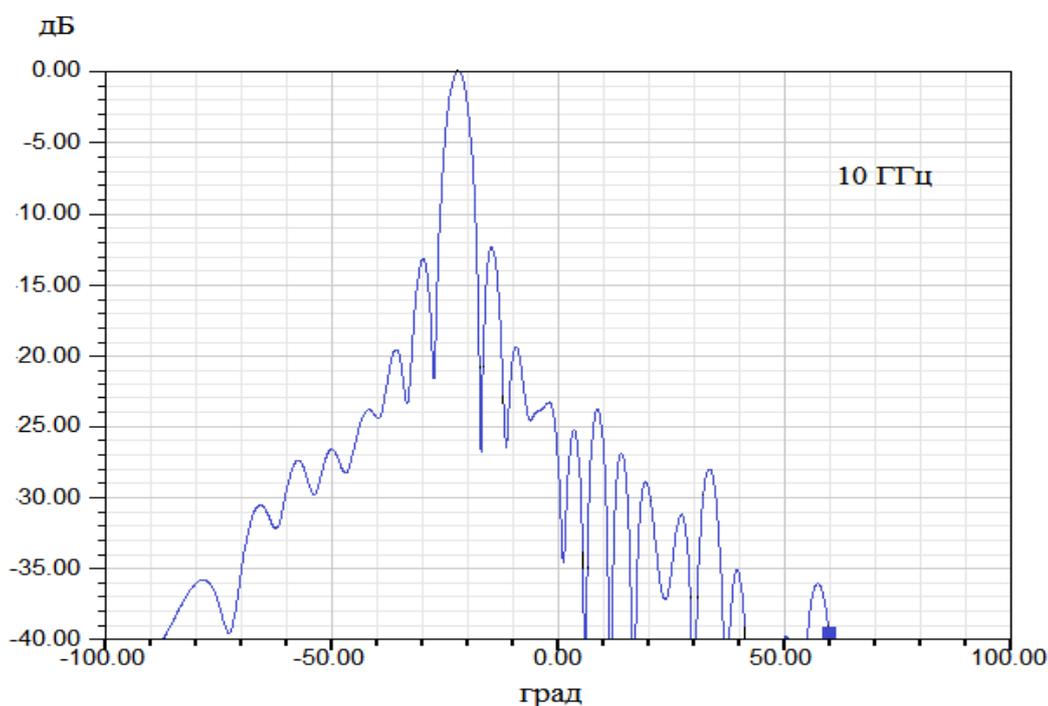


Рис. 3. Угловое распределение нормированной амплитуды поля в плоскости  $ZOY$  в области фокусировки на центральной частоте 10 ГГц при синфазном возбуждении волноводов.

Как видно на рисунке, в данном сечении фокальное пятно, соответствующее "минус первой гармонике", имеет достаточно низкий уровень боковых лепестков, побочные максимумы, в том числе "нулевая гармоника" - отсутствует. Рис. 4 иллюстрирует изменение положения фокального пятна в плоскости  $ZOY$  при изменении частоты ( $f=9$  ГГц, 9.5 ГГц, 10 ГГц) при синфазном возбуждении волноводов. На рисунке изображено двумерное распределение нормированной амплитуды поля.

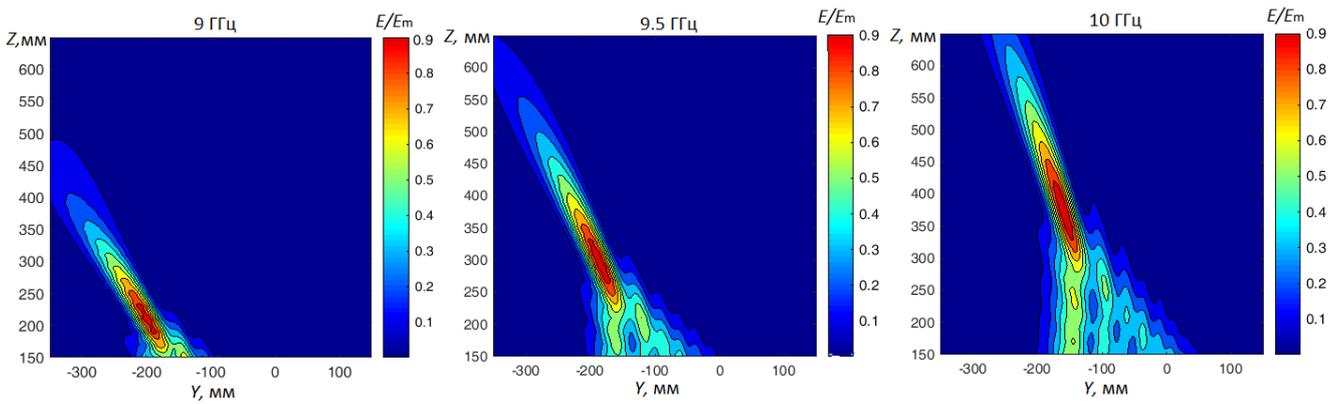


Рис. 4. Амплитуда поля решётки в плоскости частотного сканирования на частотах 9 ГГц, 9.5 ГГц, 10 ГГц при синфазном возбуждении волноводов.

На рис. 5 изображены распределения нормированной функции  $rE(r)$  в плоскости  $Z0Y$  ( $E$  - амплитуда поля,  $r$  - расстояние до точки наблюдения от центра решётки), характеризующей коэффициент направленного действия решётки при изменении частоты при синфазном возбуждении волноводов.

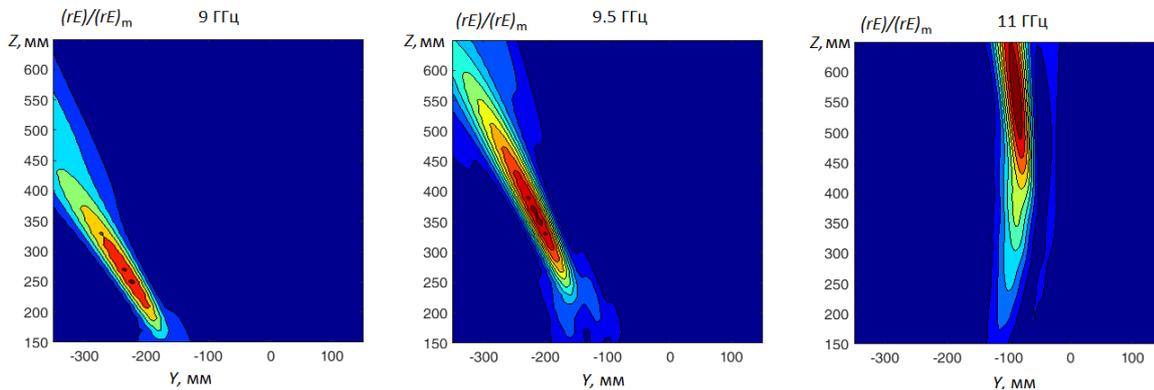


Рис.5. Распределение нормированной величины  $(rE)$  в плоскости  $Z0Y$  на частотах 9 ГГц, 9.5 ГГц, 11 ГГц при синфазном возбуждении волноводов.

Как видно на рисунке, функция  $rE(r)$  из-за учёта расстояния  $r$  более наглядно характеризует эффективность фокусировки в зоне Френеля решётки.

Зависимости углов  $\theta$ ,  $\varphi$  (угла места и азимутального угла) для пространственных фокальных кривых в сферической системе координат, связанной с центром решётки, при фазовом сканировании на частотах 9, 9.5, 10, 11 ГГц представлены на рис. 6, 7, соответственно.

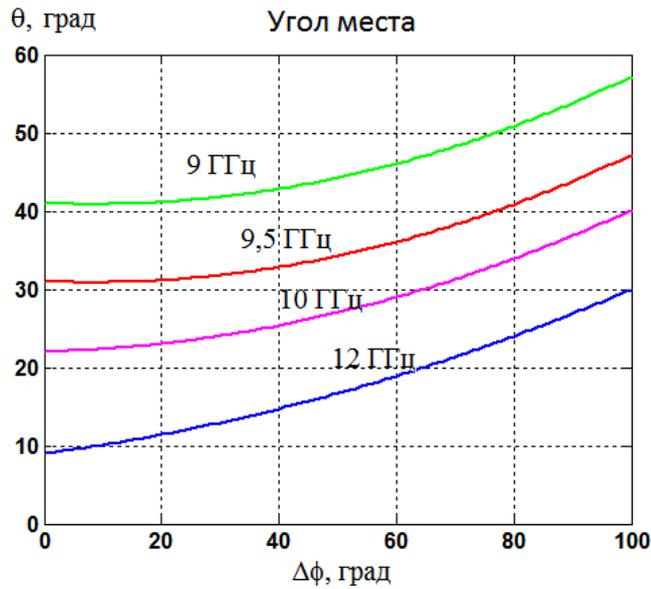


Рис.6. Зависимости угла места фокального пятна от фазового сдвига.

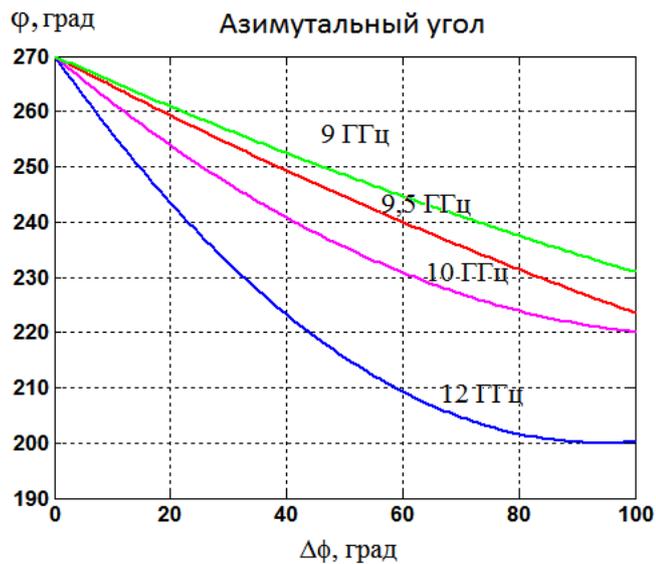


Рис. 7. Зависимости азимутального угла фокального пятна от фазового сдвига.

Как следует из расчётов, заполнение волноводов диэлектриком позволяет увеличить зону сканирования решётки по сравнению с решёткой на полых волноводах [13] при использовании одинаковой полосы частот сканирования и фазовых сдвигов между волноводами.

Пространственные фокальные кривые, характеризующие смещение фокального пятна при частотном (кривая 1) и фазовом (кривая 2) сканировании

представлены на рис. 8 (черными точками на рисунке обозначены щели решётки). Как видно на рисунке, в исследуемом диапазоне частот и сдвигов фаз зона сканирования расположена в левой относительно нормали части пространства над решёткой, а фокальная кривая частотного сканирования, как и в случае полых волноводов, имеет несимметричный характер.

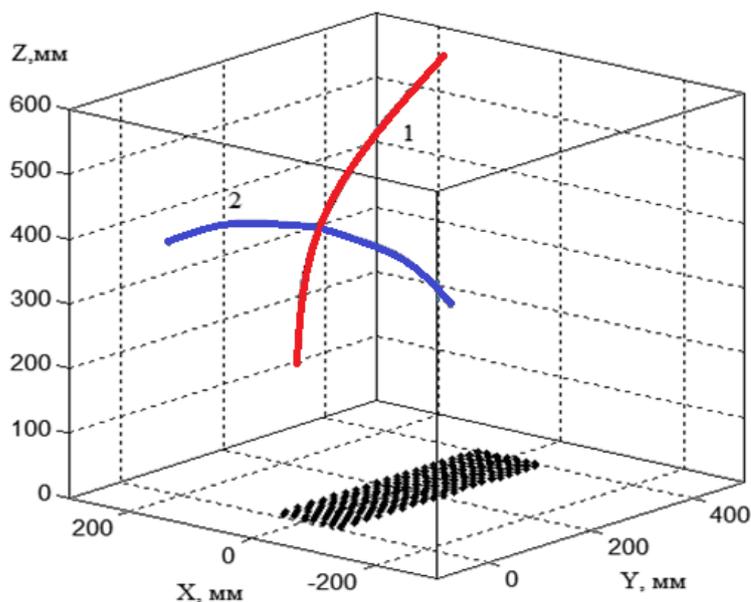
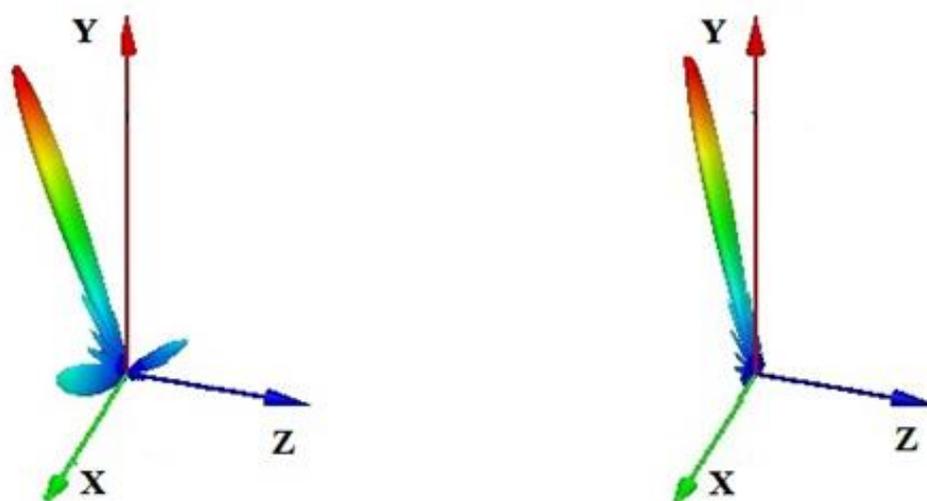


Рис.8. Фокальные кривые при частотном (кривая 1) и фазовом (кривая 2) сканировании.



а)  $\epsilon=1$ ,      б)  $\epsilon=2.2$

Рис. 9. Угловое распределение интенсивности излучение решёток на частоте 10 ГГц при фазовом сдвиге между волноводами  $90^\circ$

На рис. 9 показаны угловые распределения амплитуды поля в области максимальной фокусировки для решеток с заполнением воздухом (а) и диэлектриком с  $\varepsilon=2.2$  (б) на частоте 10 ГГц при фазовом сдвиге  $90^\circ$  между соседними волноводами. На рис.9а видно наличие в угловом распределении мощности первой решётки двух больших боковых лепестков, соответствующих побочным интерференционным гармоникам  $(-1,1)$  и  $(0,0)$ , и их отсутствие на рис.9б.

### **Заключение**

Таким образом, использование неперриодического распределения щелей вдоль волноводов решётки позволяет реализовать фокусировку излучения и частотно-фазовое сканирование в зоне Френеля решётки. Заполнение волноводов диэлектриком кроме расширения сектора сканирования при частотном сканировании подавляет излучение нулевой гармоники, а соответствующее уменьшение размера широкой стенки и расстояния между щелями подавляет излучение высших гармоник при фазовом сканировании.

Полученные характеристики частотно-фазового сканирования в волноводно-щелевой решетке с диэлектрическим заполнением, сфокусированной в зоне Френеля, позволяют оценить перспективы ее использования в составе сканирующего объектива. Необходимо учитывать, что сфокусированные волноводно-щелевые решётки металлических волноводов, как с воздушным, так и с диэлектрическим заполнением, обладают недостатком – несимметричной относительно нормали к решётке формой фокальной поверхности. Решение этой проблемы можно решить за счет использования нерегулярных волноводов, однако в данной работе этот вопрос не рассматривается.

### **Литература**

1. A.Buffi, A.Serra, P.Nepa, H.Chou, and G.Manara “A focused planar microstrip array for 2.4 GHz RFID readers”, IEEE Trans. Antennas Propag., 2010, vol. 58, no. 5, pp. 1536–1544.

2. P. T. Nguyen, A. M. Abbosh, S. Crozier "3-D Focused Microwave Hyperthermia for Breast Cancer Treatment With Experimental Validation", IEEE Trans. Antennas and Propag., 2017, vol. 65, no. 7, pp. 3489 - 3500.
3. F. Tofigh, J. Nourinia, M. N. Azarmanesh, K. M. Khazaei, "Near-field focused array microstrip planar antenna for medical applications", IEEE Antennas Wireless Propag., 2014, vol. 13, pp. 951–954.
4. K. D. Stephan, J. B. Mead, D. M. Pozar, L. Wang, J. A. Pearce, "A near field focused microstrip array for a radiometric temperature sensor", IEEE Trans. Antennas Propag., 2007, vol. 55, no. 4, pp. 1199–1203.
5. M. Bogosanovic and A. G. Williamson, "Microstrip antenna array with a beam focused in the near-field zone for application in noncontact microwave industrial inspection", IEEE Trans. Instrum.Meas., 2007, vol. 56, no. 6, pp. 2186–2195.
6. J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, "Directing and Focusing Electromagnetic Waves using Leaky and Travelling Wave concepts for Wireless Power Transmission". International Summer School in Wireless Power Transmission for Space Applications 23-26 June 2014. Aveiro, Portugal.  
[http://www.costic1301.org/files/TS1\\_Aveiro/June\\_25\\_2014\\_1130\\_Tornero.pdf](http://www.costic1301.org/files/TS1_Aveiro/June_25_2014_1130_Tornero.pdf).
7. Peng-Fa Li, Shi-Wei Qu, Shiwen Yang, Zai-Ping Nie "Microstrip Array Antenna With 2-D Steerable Focus in Near-Field Region", IEEE Trans. Antennas Wireless Propag., 2017, vol. 65, no. 9, pp. 4607 – 4617.
8. I. Ohtera "Focusing Properties of a Microwave Radiator Utilizing a Slotted Rectangular Waveguide", IEEE Antennas Wireless Propag., 1990, vol. 38, no.1, pp. 121-124.
9. M. Ettorre, M. Casaletti, G. Valerio, R. Sauleau, L. Le Coq, S. C. Pavone, M. Albani "On the Near-Field Shaping and Focusing Capability of a Radial Line Slot Array", IEEE Antennas Wireless Propag., 2014, vol. 62, no.4, pp.1991-1999.
10. J. L. Gómez-Tornero, F. Quesada-Pereira, A. Alvarez-Melcón, G. Goussetis, A. R. Weily, and Y. J. Guo, "Frequency steerable two dimensional focusing using

- rectilinear leaky-wave lenses”, IEEE Antennas Wireless Propag., 2011. vol. 59, no. 2, pp. 407–415.
11. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, F. J. Clemente-Fernández, J. Monzó-Cabrera. “Microwave Near-Field Focusing Properties of Width-Tapered Microstrip Leaky-Wave Antenna”, IEEE Antennas Wireless Propag., 2013, vol. 61, no.6, pp. 2981-2990.
  12. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.В. “Синтез и анализ планарной волноводной решетки с частотным сканированием, сфокусированной в зоне Френеля”, РЭ. 2016. Т.61. №6. С.547-557.
  13. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.В. "Исследование характеристик частотно-фазового сканирования сфокусированной волноводно-щелевой решётки”, Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2017, №5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/9/text.pdf>.
  14. R. Cambior, S. V. Hoyer, M. Fernández, C. V. Antuña, F. Las-Heras “Submillimeter Wavelength 2-D Frequency Scanning Antenna Based on Slotted Waveguides Fed Through a Phase Shifting Network”, IEEE Trans. Antennas Propag, 2017, vol. 65, no. 7, pp. 3501-3509.
  15. Калиничев В.И., Бабаскин А.А. “Частотно-фазовое сканирование волноводно-щелевых антенных решеток, заполненных диэлектриком”, Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2017. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/14/text.pdf>.

**Ссылка на статью:**

В. А. Калошин, Е. В. Фролова. Радиообъектив с частотно-фазовым сканированием на основе волноводно-щелевой решётки вытекающей волны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/3/text.pdf>