

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО СКАНИРОВАНИЯ СФОКУСИРОВАННОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ РЕШЁТКИ

С. Е. Банков, 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 12 мая 2017 г.

Аннотация. Приведены результаты исследования частотно-фазового сканирования в радиообъективе в виде сфокусированной решетки волноводов вытекающей волны с переменным расстоянием между щелями вдоль волновода. Сканирование сфокусированного излучения в зоне Френеля решётки осуществляется в двух плоскостях: в плоскости образованной осью волновода и нормалью к решетке - за счёт изменения частоты, а в ортогональной плоскости - за счёт изменения сдвига фазы между соседними волноводами решётки. Исследовано появление и положение интерференционных максимумов излучения решётки. Проведено сравнение с характеристиками сканирования периодической решетки.

Ключевые слова: антенна вытекающей волны, волноводно-щелевая решётка, фокусировка в зоне Френеля, частотно-фазовое сканирование.

Abstract. Results of a research of phase-frequency scanning in the radio-objective representing the focused array of leaky wave waveguides with variable distance between slots along waveguide are given. Scanning of a focused radiation in a Fresnel zone of the array is carried out in two directions: in the plane formed by the waveguide axis and the normal to the array due to change of frequency and crosswise - due to change of a phase shift between the next waveguides of the array. Emergence and positions of the interference maxima of the array radiation are investigated. Comparison to scanning characteristics of periodic arrays is carried out.

Keywords: leaky wave antenna, slotted waveguide array, focusing in a Fresnel zone, phase-frequency scanning.

1. Введение

Сфокусированные антенны (радиообъективы), обладающие свойством концентрации излучения в зоне Френеля, в частности, планарные фокусирующие решётки, могут найти применение в различных областях современной радиоэлектроники [1, 2]:

Несмотря на разнообразие конструкций радиообъективов и технологических особенностей их реализации, существует единый подход к описанию основных характеристик излучения в области фокусировки. При этом для описания сфокусированных решеток, как правило, исследуются такие характеристики, как размеры продольного и поперечного сечения фокального пятна, уровень боковых лепестков, геометрия фокальной поверхности и т.д. [3-6].

По сравнению с объективами, осуществляющими фокусировку на одной частоте, исследованию сфокусированных антенн с частотным сканированием посвящено сравнительно небольшое количество работ. К ним относятся работы, в которых рассматриваются волноводные структуры на вытекающих волнах с непрерывным [4] и дискретным [5,6] распределением излучателей. Данная работа представляет собой продолжение работ [5,6] и посвящена исследованию характеристик частотно-фазового сканирования в сфокусированной планарной волноводно-щелевой решётке с неперiodическим распределением продольных щелей вдоль широкой стенки волновода.

Моделирование излучения сфокусированной решетки проведено в работе численным методом конечных элементов, для сравнения была также рассмотрена двумерно-периодическая волноводно-щелевая антенная решётка с частотно-фазовым сканированием в дальней зоне. Основное внимание в работе было уделено исследованию пространственной локализации области фокусировки при изменении частоты излучения (частотном сканировании) и сдвига фаз между волноводами решётки (фазовом сканировании). При этом исследовались характеристики как основного, так и побочных лепестков

(интерференционных максимумов излучения решётки), а также боковое излучение.

2. Синтез полотна решетки

Вид фокусирующей решетки представлен на рис. 1. Исследуемая решетка состоит из пяти волноводов с воздушным заполнением, в каждом волноводе расположены по два ряда из 16 продольных щелей с размерами 12.5×1.5 мм, смещенных от средней линии волновода на четверть размера широкой стенки. Размер поперечного сечения волноводов 10×23 мм, размер апертуры решетки 115×428 мм. Закон распределения положения щелей найден из условия расположения точки фокусировки на расстоянии $R_f = 460$ мм под углом $\theta_f = -30^\circ$ от нормали к решетке, проведенной из ее центра с координатами $x = 0, y = 214$ мм на центральной частоте диапазона сканирования $f = 10$ ГГц. При синтезе полотна решетки разность фаз между модами соседних волноводов полагалась равной нулю, а постоянная распространения β волноводной моды полагалась равной постоянной распространения волновода без щелей, как и в работах [5,6].

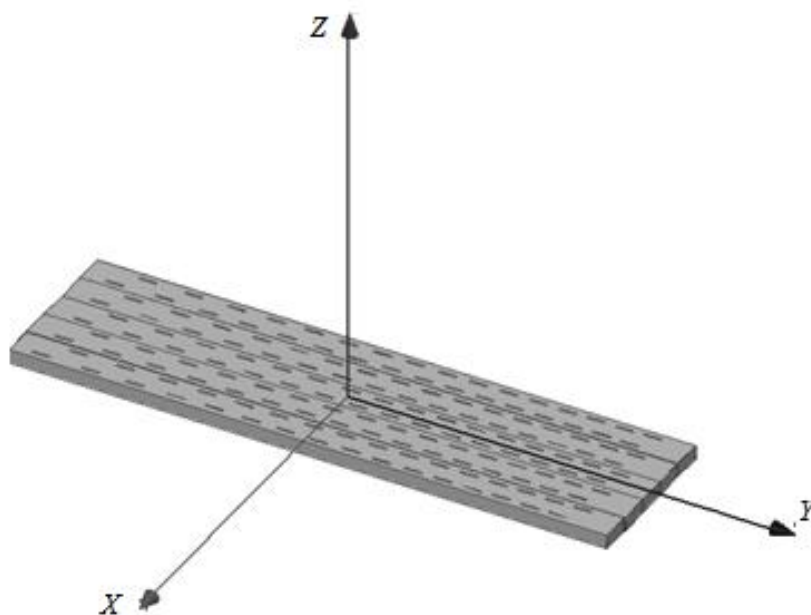


Рис. 1. Сфокусированная решетка волноводов вытекающей волны.

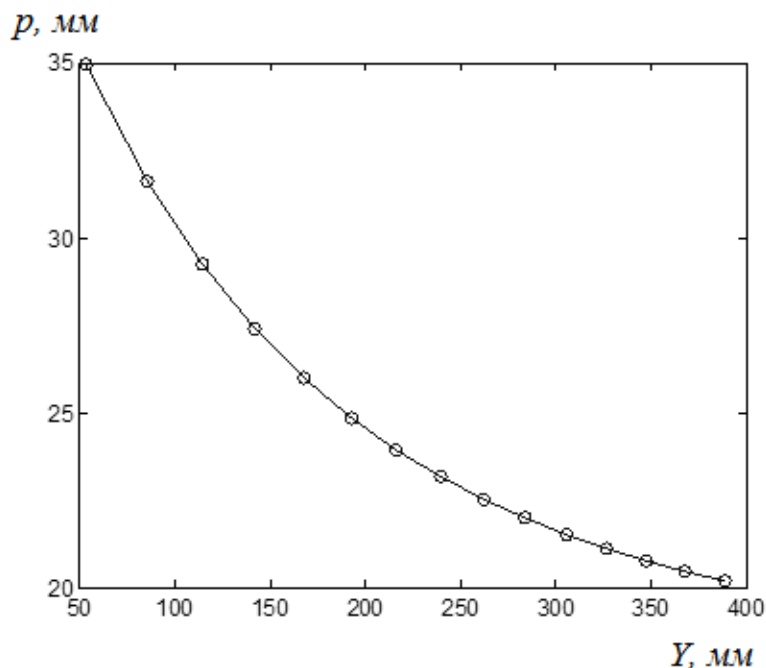


Рис. 2. Зависимость расстояния между щелями от продольной координаты.

Зависимость расстояния между соседними щелями вдоль волновода от продольной координаты Y приведена на рис. 2 сплошной линией, точками на этом рисунке отображены координаты центров щелей одной из двух линеек щелей центрального волновода.

Длины щелей были выбраны из условия $S_{21} = -10$ дБ в центральном волноводе решётки, характеризующего затухание волны вдоль волновода на центральной частоте $f=10$ ГГц.

Пространственное сканирование или изменение положения максимума сфокусированного излучения в зоне Френеля осуществляется по трем координатам: в направлении оси Y - за счёт изменения частоты (частотное сканирование), а в направлении оси X - за счёт изменения сдвига фазы между входами соседних волноводов решётки (фазовое сканирование). При частотном сканировании меняется координата Z максимума излучения, т.е. в отличие от дальней зоны, где частотно-фазовое сканирование является двумерным, сканирование в зоне Френеля сфокусированной решётки при изменении частоты и сдвига фаз между входами волноводов является трёхмерным, и при

сканировании меняются как угловые координаты θ , φ области максимальной фокусировки, так и ее расстояние от центра решётки r . Мы ограничимся исследованием фазового сканирования только при линейном фазовом сдвиге, который может быть реализован с использованием управляемых фазовращателей, либо многолучевой диаграммообразующей схемы. Искажениями фазы из-за её дискретизации в фазовращателях или аберраций в квазиоптической диаграммообразующей схеме на данном этапе исследования мы пренебрегаем.

Таким образом, задача исследования характеристик сканирования сфокусированной решётки сводится к нахождению фокальной поверхности - определению пространственных координат центра области максимальной концентрации поля при изменении частоты и сдвига фаз между волноводами в заданных диапазонах изменения этих величин, а также определению геометрических и энергетических характеристик фокального пятна и боковых лепестков.

3. Характеристики сканирования

Характеристики сканирования решётки, изображённой на рис. 1, исследовались численно с использованием электродинамического моделирования методом конечных элементов. Частота излучения при исследовании менялась в диапазоне от 8 ГГц до 13 ГГц, фазовый сдвиг между соседними волноводами менялся от 0° до 150° , что соответствует отклонению луча на центральной частоте в поперечном направлении на угол от 0 до 33° .

Для получения характеристик поля в области максимальной фокусировки для заданных значений частоты и фазового сдвига предварительно проводился поиск максимума величины $rE(r)$ в сферических координатах r , θ , φ . Максимуму произведения $rE(r)$ соответствует максимальный коэффициент направленного действия. Следует отметить, что максимумы амплитуды электрического поля $E(r)$ и произведения $rE(r)$

достигаются на различных расстояниях от плоскости решётки и на различных фокальных поверхностях.

Пример радиальной зависимости величины $rE(r)$ в плоскости ZOY на центральной частоте $f = 10$ ГГц при синфазном возбуждении волноводов ($\Delta\phi=0^\circ$) приведён на рис. 3 (кривая 2). На этом же рисунке представлена радиальная зависимость амплитуды поля (кривая 1), при этом обе величины нормированы на свои максимальные значения. Как видно на рисунке, максимум величины $rE(r)$ наблюдается при значении $r_m=460$ мм, максимуму $E(r)$ соответствует значение $r_m=380$ мм.

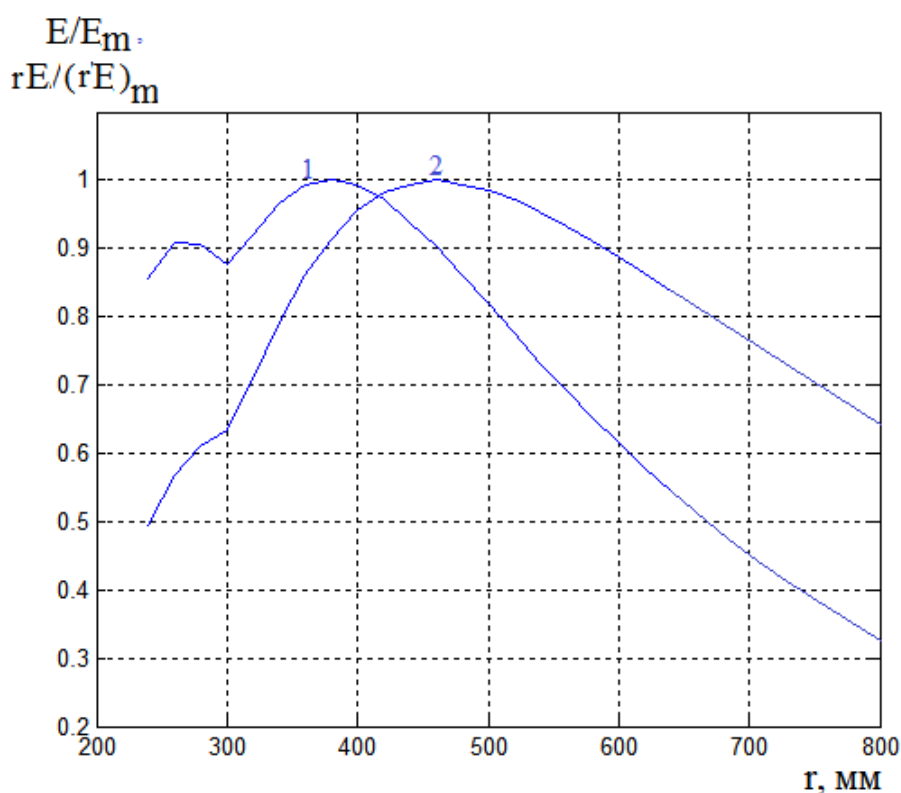
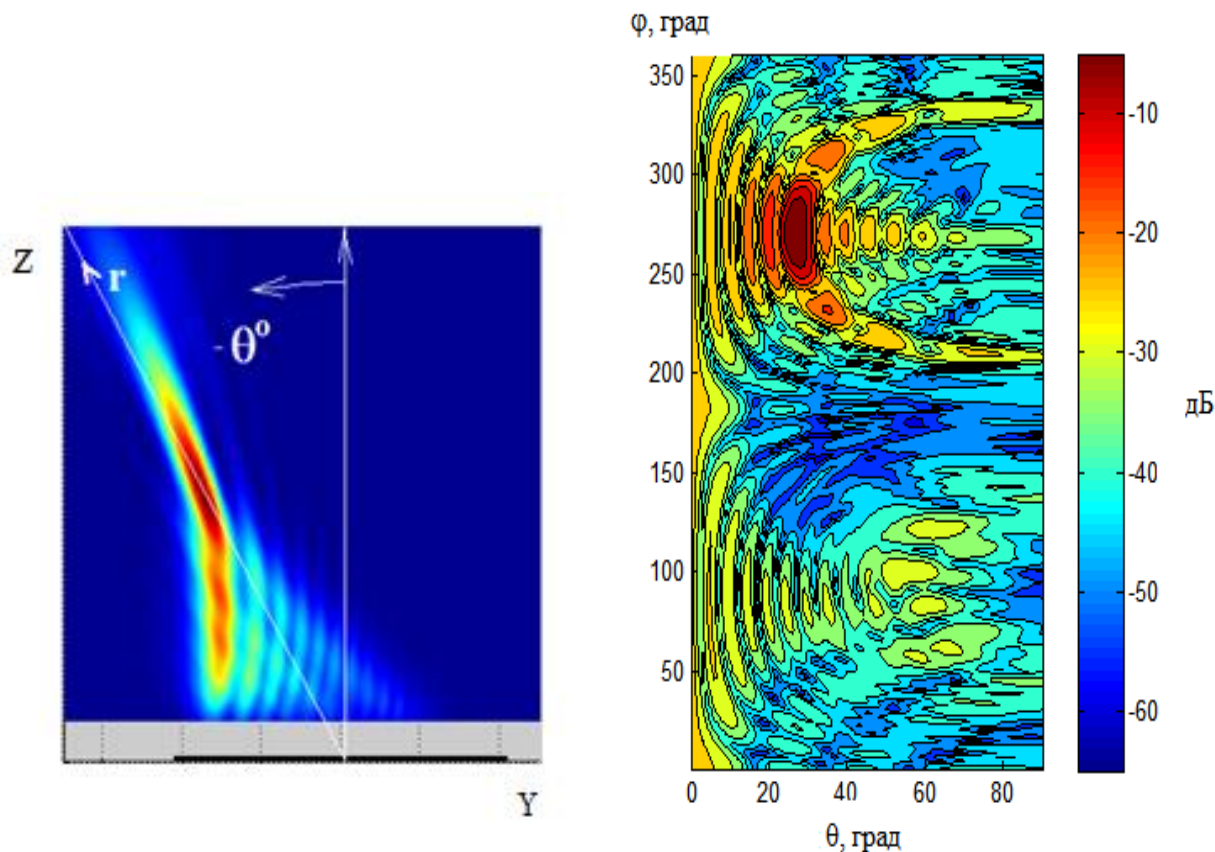


Рис. 3. Зависимости амплитуды поля $E(r)$ (кривая 1) и величины $rE(r)$ (кривая 2) от расстояния от центра решётки на частоте 10 ГГц.

На рис. 4 приведены характеристики поля в области фокусировки: интенсивность (мощность) излучения $E^2(y,z)$ в сечении ZOY (рис. 4а) и распределение амплитуды поля (в децибелах) на сфере радиуса $r_m=460$ мм (рис. 4б) на центральной частоте $f=10$ ГГц при синфазном возбуждения волноводов.



а) в сечении ZOY

б) на сфере радиуса $r_m=460$ мм

Рис. 4. Сечения области фокусировки излучения на центральной частоте $f=10$ ГГц при синфазном возбуждении волноводов.

Радиальные зависимости нормированных величин $E(r)$ и $rE(r)$ в плоскости ZOY при синфазном возбуждения волноводов ($\Delta\phi=0^\circ$) приведены, соответственно, на рис. 5,6 на частотах 8,9,10,12,13 ГГц (кривые 1,2,3,4,5). Как видно на рисунках, с ростом частоты расстояние от центра решётки до максимумов величин $E(r)$ и $rE(r)$ увеличивается. Координаты этих максимумов определяют фокальную кривую в плоскости ZOY при частотном сканировании.

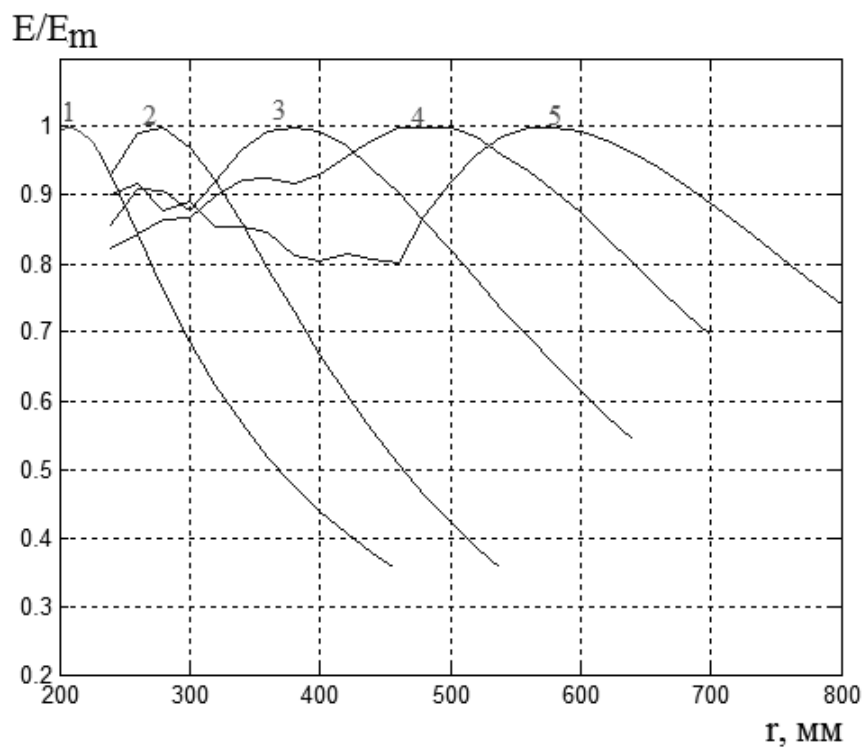


Рис. 5. Радиальное распределение нормированной амплитуды поля $E(r)$ на частотах 8,9,10,12,13 ГГц (кривые 1,2,3,4,5, соответственно).

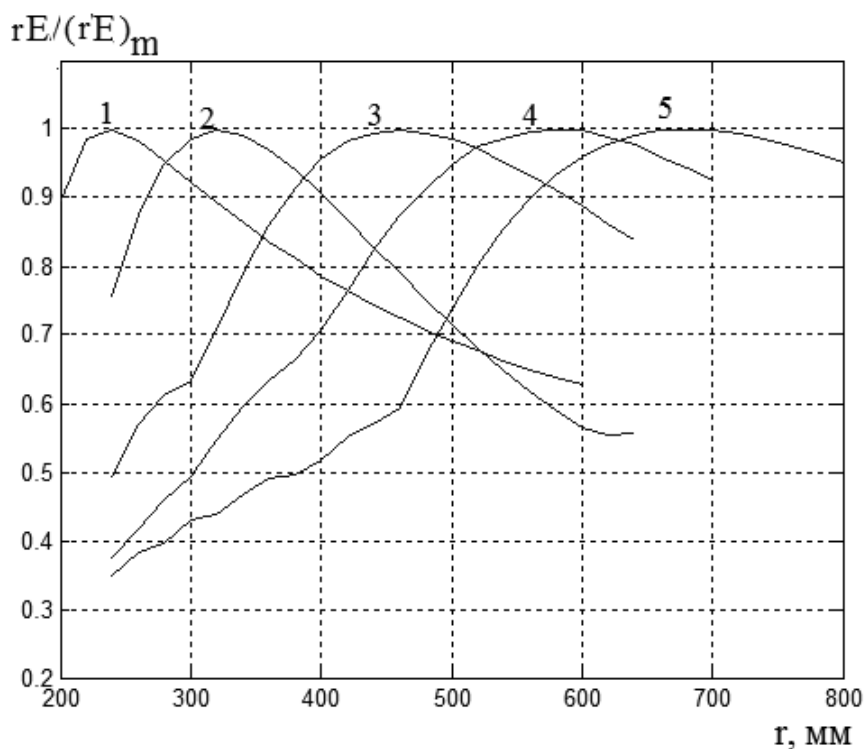


Рис. 6. Рис. 5. Радиальное распределение нормированной величины $rE(r)$ на частотах 8,9,10,12,13 ГГц (кривые 1,2,3,4,5, соответственно).

Рассмотрим далее характеристики излучения решётки при изменении частоты и несинфазном возбуждении волноводов решётки.

Пространственные кривые, соответствующие фокальным линиям при частотном и фазовом сканировании изображены на рис. 7 (кривая 1 - частотное сканирование в плоскости ZOY в случае синфазного возбуждения волноводов, кривая 2 - фазовое сканирование на центральной частоте $f=10$ ГГц).

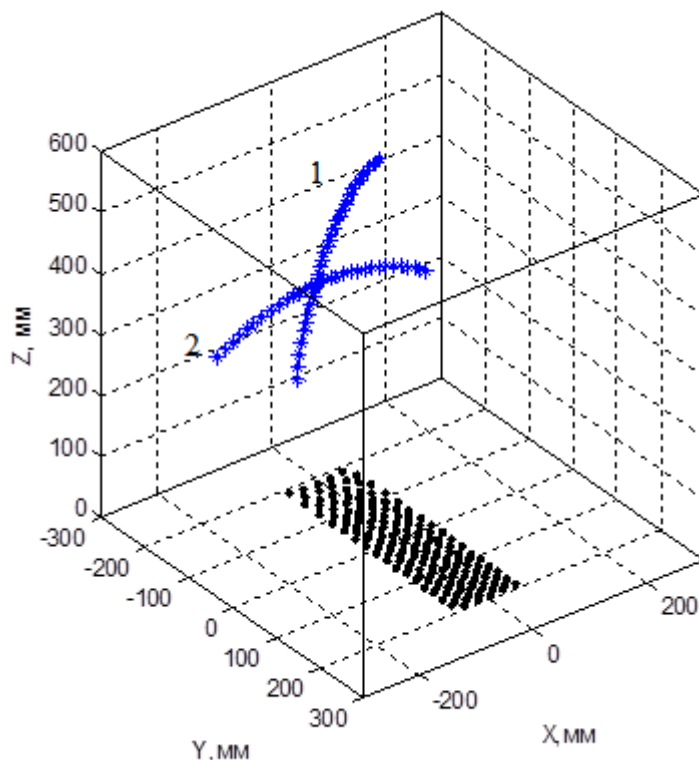


Рис. 7. Пространственные фокальные кривые при частотном и фазовом сканированиях

Как видно на рис. 7 и как было ранее показано в [5,6], при частотном сканировании в сфокусированной решётке с уменьшением частоты расстояние до сферы максимальной фокусировки уменьшается. При фазовом сканировании на центральной частоте форма фокальной кривой (кривая 2 на рис. 6) близка к окружности.

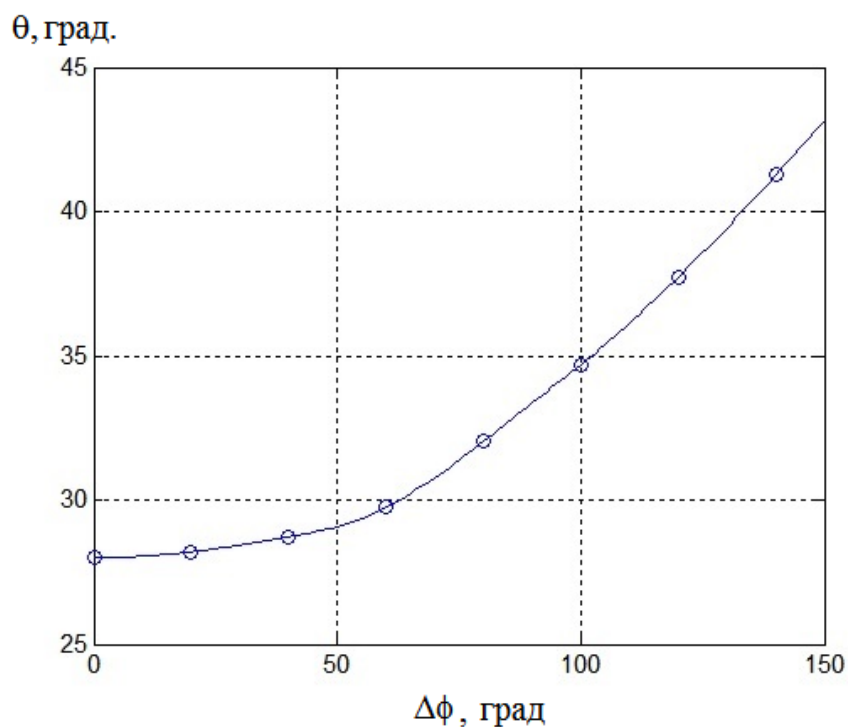


Рис. 8. Зависимость угла θ от фазового сдвига между волноводами на частоте 10 ГГц

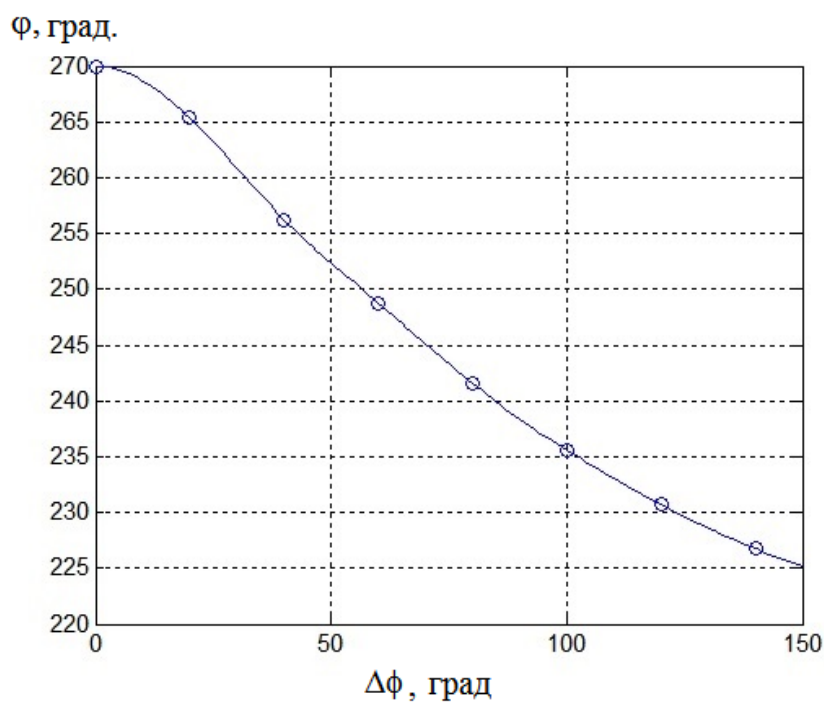


Рис. 9. Зависимость угла ϕ от фазового сдвига между волноводами на частоте 10 ГГц.

Рис. 10 иллюстрирует падение коэффициента направленного действия излучения решётки на этой кривой.

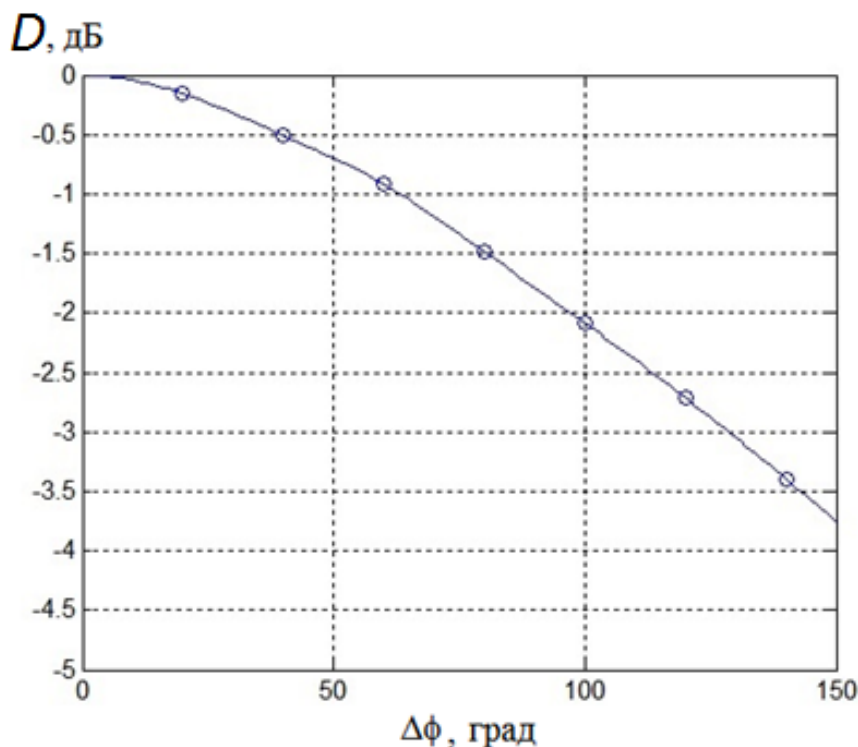


Рис. 10. Зависимость КНД от фазового сдвига между волноводами на частоте 10 ГГц.

Как видно из рисунка, ослабление интенсивности на 3 дБ на фокальной кривой, образующейся при фазовом сканировании, происходит при фазовом сдвиге между волноводами $\Delta\phi=130^\circ$, что соответствует отклонению луча на углы $\theta=38^\circ$, $\varphi=229^\circ$ относительно положения луча при синфазном возбуждении волноводов ($\theta=28^\circ$, $\varphi=270^\circ$).

Как было показано в [7], при частотно-фазовом сканировании в периодической решётке из волноводов с воздушным заполнением помимо основной гармоники излучения (так называемой "минус первой" при одномерном частотном сканировании) возникают побочные пространственные гармоники (побочные лучи). Условия возникновения этих лучей определяются периодами излучателей в продольном и поперечном направлении, а также длиной волны излучения и фазовым сдвигом между волноводами.

Представляет интерес исследование этого явления в сфокусированной

решётке, в которой отсутствует периодичность расположения щелей в продольном направлении.

Для сравнительного анализа излучения побочных пространственных гармоник помимо сфокусированной решётки была рассмотрена периодическая волноводно-щелевая решётка. Вид этой решётки изображён на рис. 12.

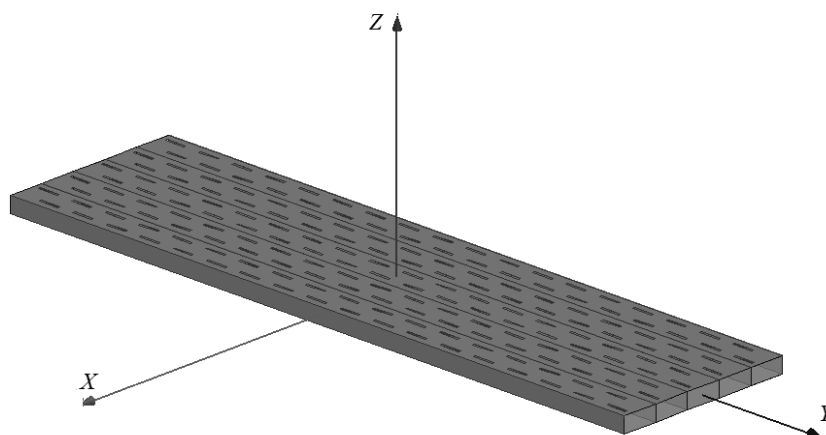


Рис. 12. Решётка вытекающей волны с постоянным периодом щелей

Данная решётка состоит из пяти волноводов с воздушным заполнением, в каждом волноводе расположены два ряда по 18 продольных щелей, смещенных от средней линии волноводов на четверть размера широкой стенки. Размер поперечного сечения волноводов, как и в ранее рассмотренной решётке, 10x23 мм, размер апертуры решетки 115x432 мм. Число щелей вдоль волноводов было выбрано из условия приблизительного сохранения размера апертуры решётки. Длина щелей подбиралась с целью обеспечения прежнего значения коэффициента $S_{21} = -10$ дБ в центральном волноводе решётки, характеризующего уменьшение амплитуды поля вдоль волновода на центральной частоте $f = 10$ ГГц. Период решётки был выбран равным 23.84 мм при условии излучения основной гармоники на частоте 10 ГГц под углом -30° от нормали к решётке, т.е. под тем же углом, что и в эквивалентной сфокусированной решётке.

Радиальное распределение амплитуды поля в зоне Френеля данной решётки в сравнении с приведённым ранее распределением амплитуды поля

над сфокусированной решёткой приведено на рис. 13. Нормировка кривых на рисунке выполнена на максимальное значение амплитуды поля сфокусированной решётки.

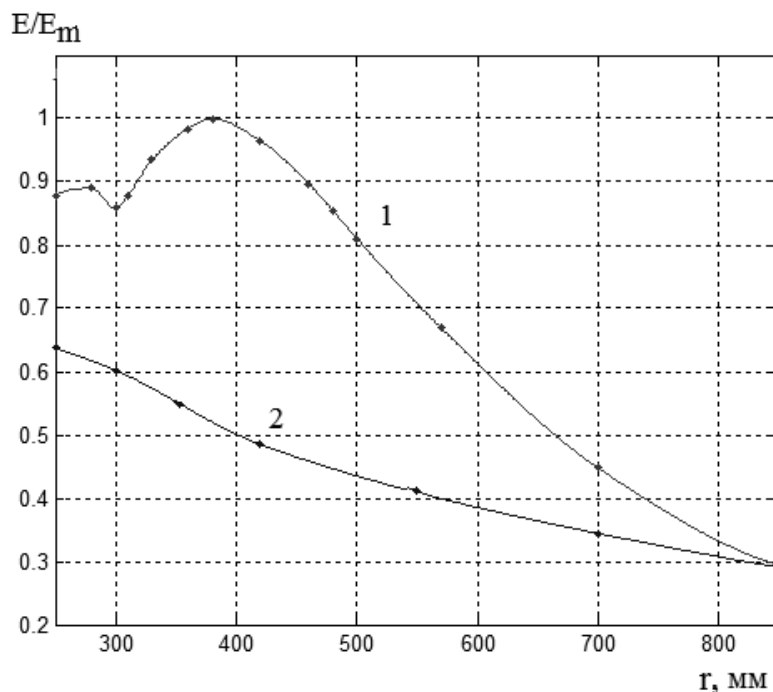
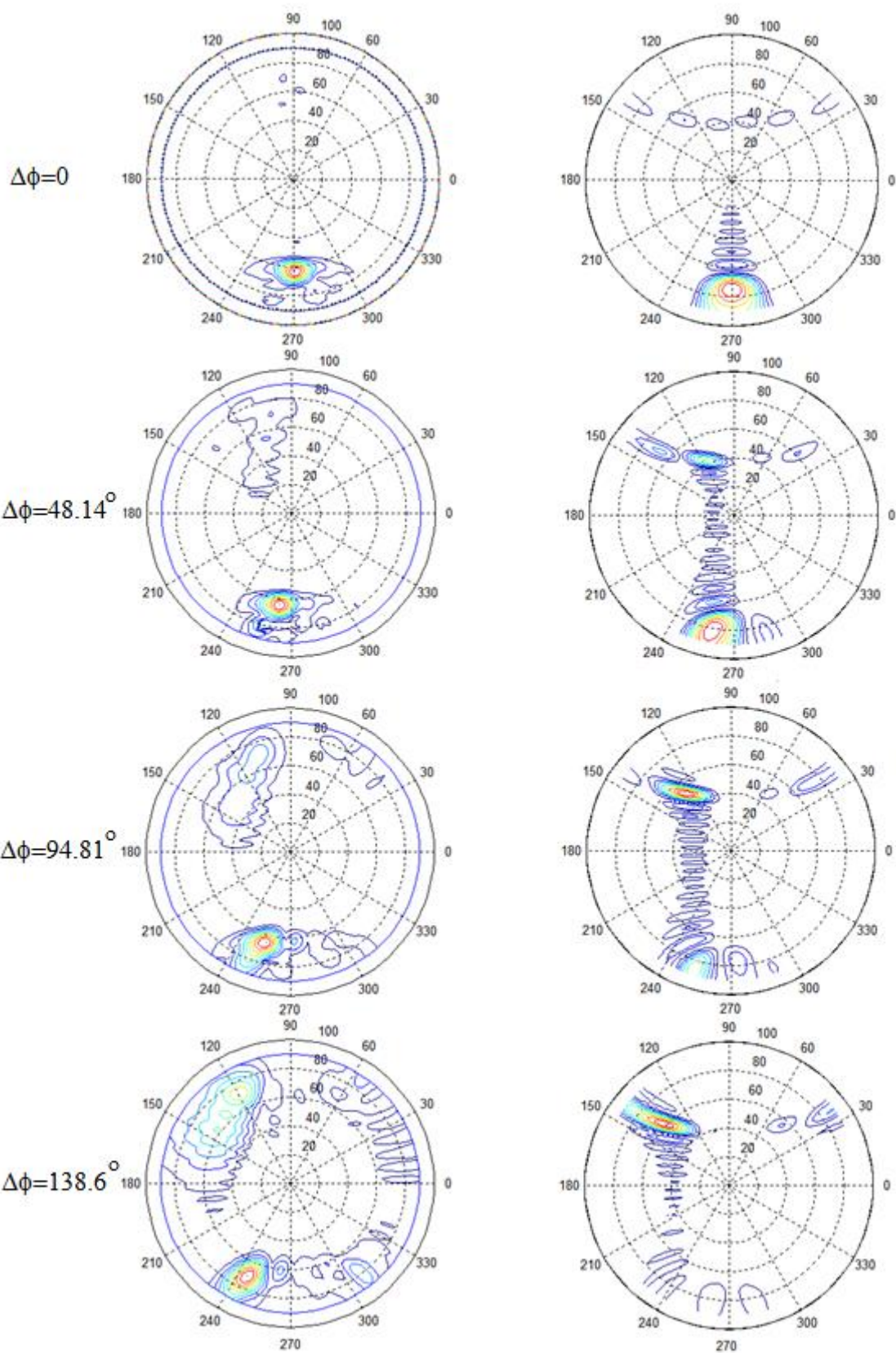


Рис. 13. Радиальные распределения амплитуды поля $E(r)$ на частоте 10 ГГц в зоне Френеля периодической (2) и сфокусированной (1) решёток.

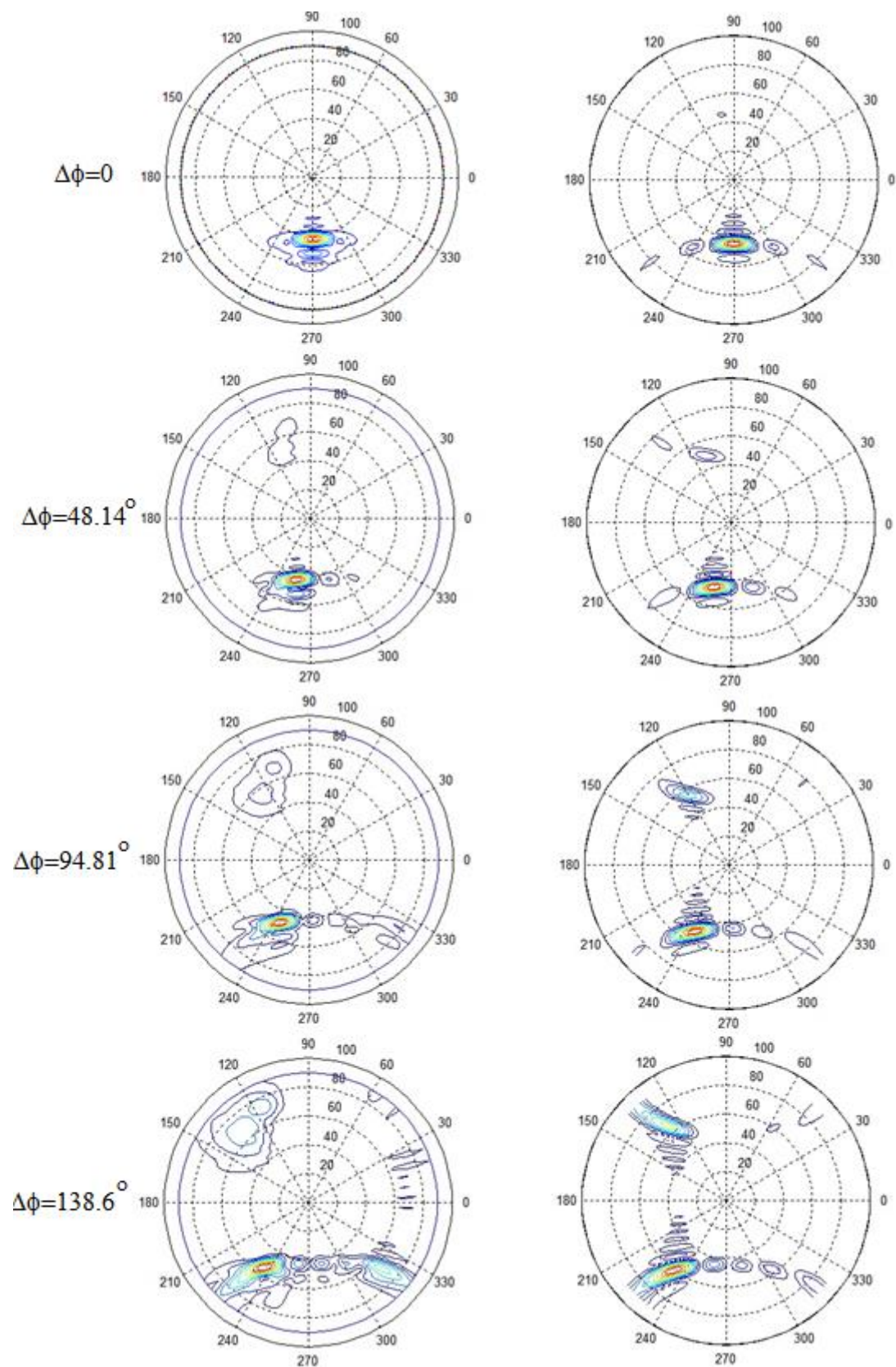
На рисунках 14а -19а представлены результаты расчётов характеристик излучения сфокусированной решётки на фокальной поверхности с максимальной фокусировкой излучения (с максимальной величиной $rE(r)$) при частотно-фазовом сканировании, а на рис. 14б-19б - двумерно-периодической решётки в дальней зоне. Характеристики излучения на частотах 8, 9, 10, 11, 12, 13 ГГц изображены в виде линий уровня поля в верхней полусфере над плоскостью решётки в зависимости от сферических координат θ , φ при различных сдвигах фазы $\Delta\phi$, вызывающему поворот луча решётки на частоте 10 ГГц в поперечном плоскости (XU), соответственно, на 0° , 10° , 20° , 30° .



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

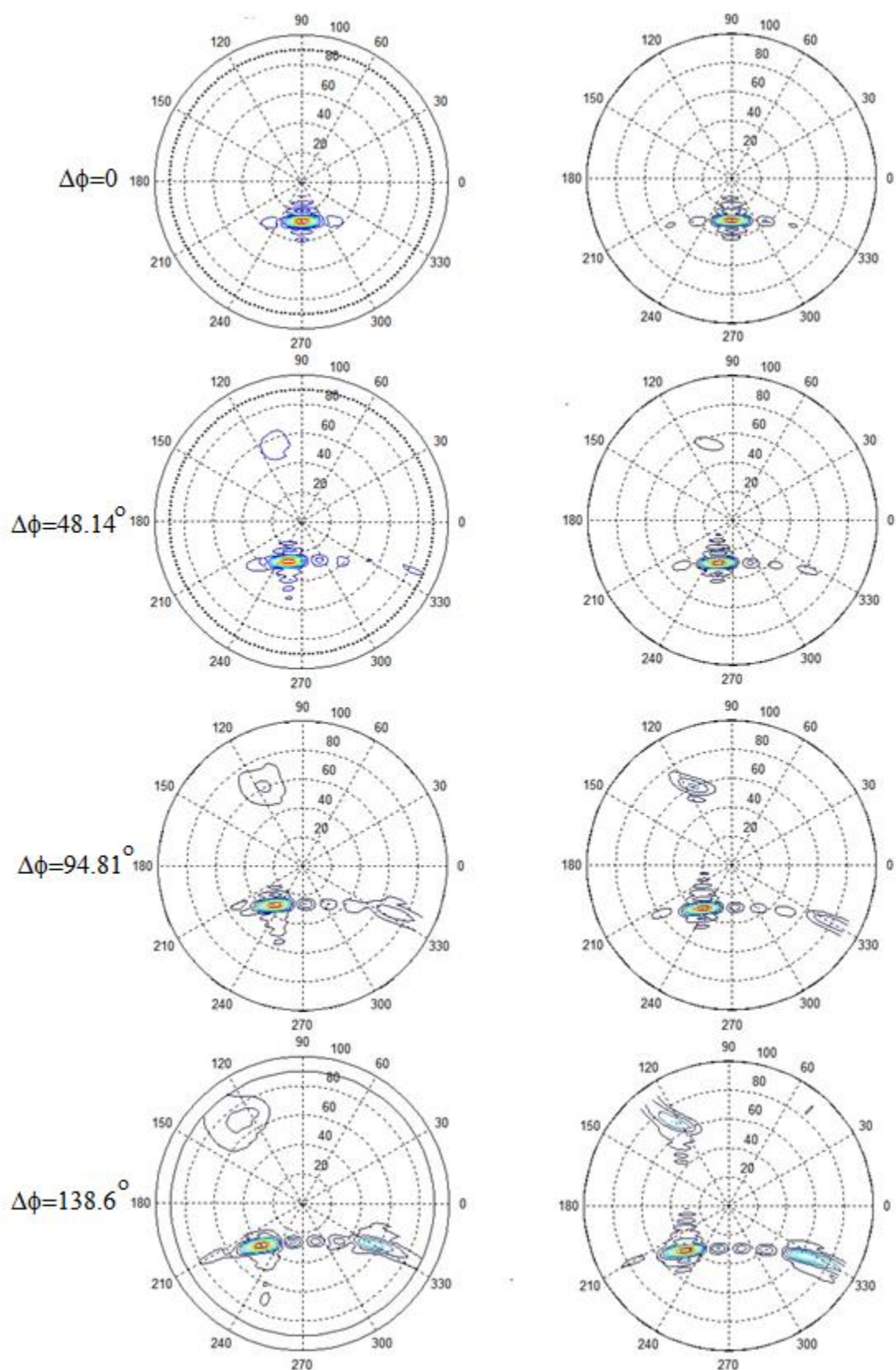
Рис. 14. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=8$ ГГц.



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

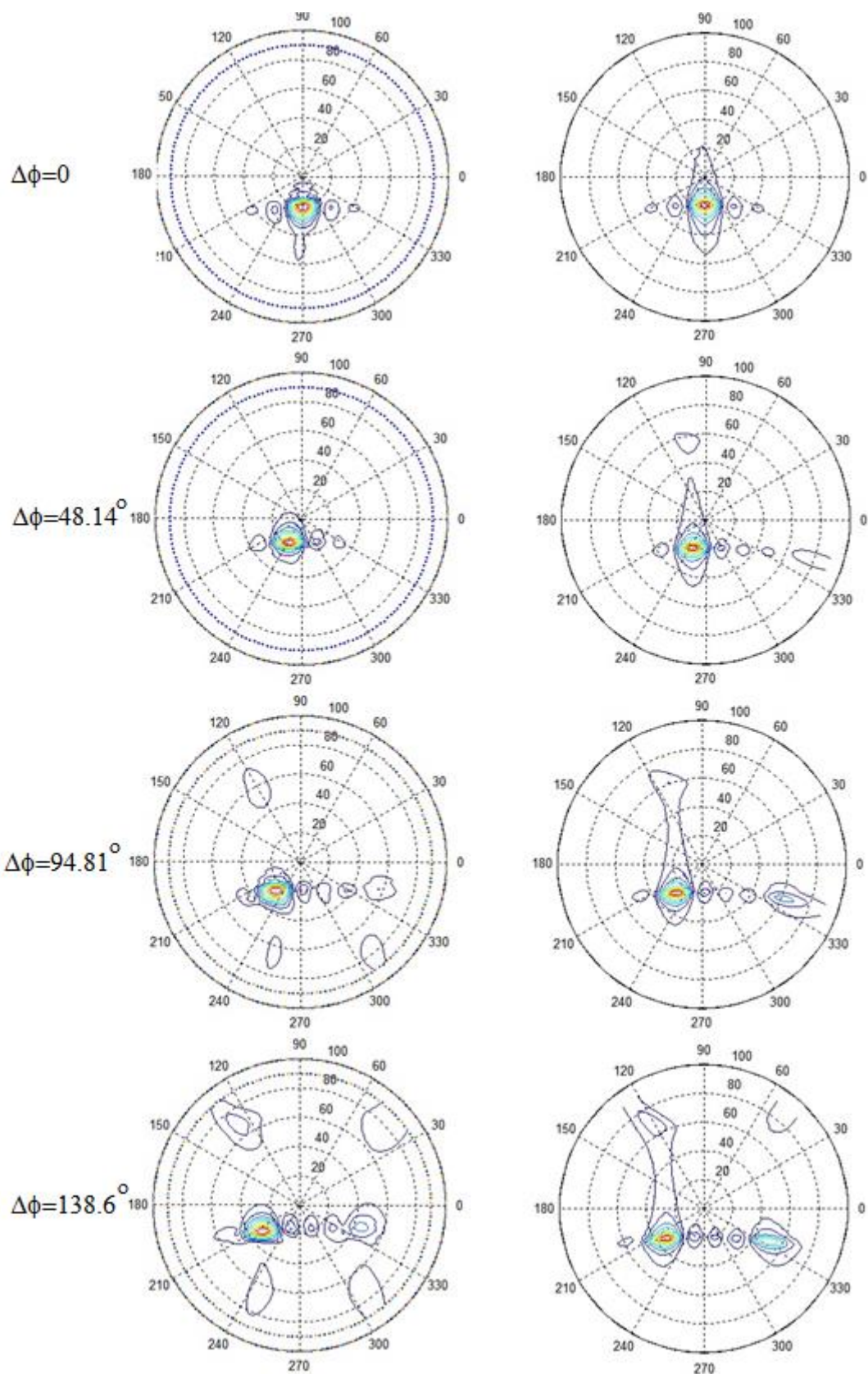
Рис. 15. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=9$ ГГц.



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

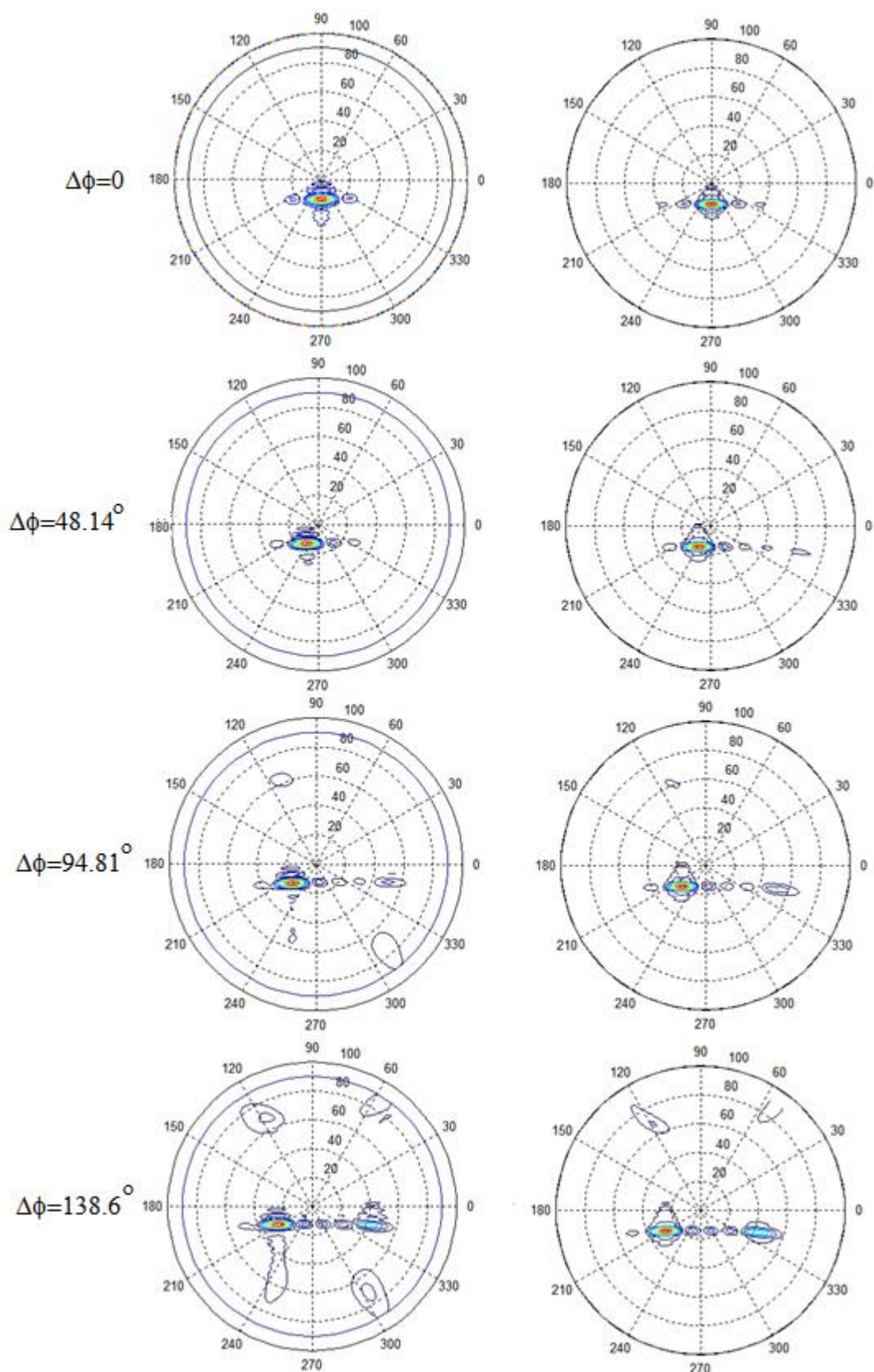
Рис. 16. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=10$ ГГц.



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

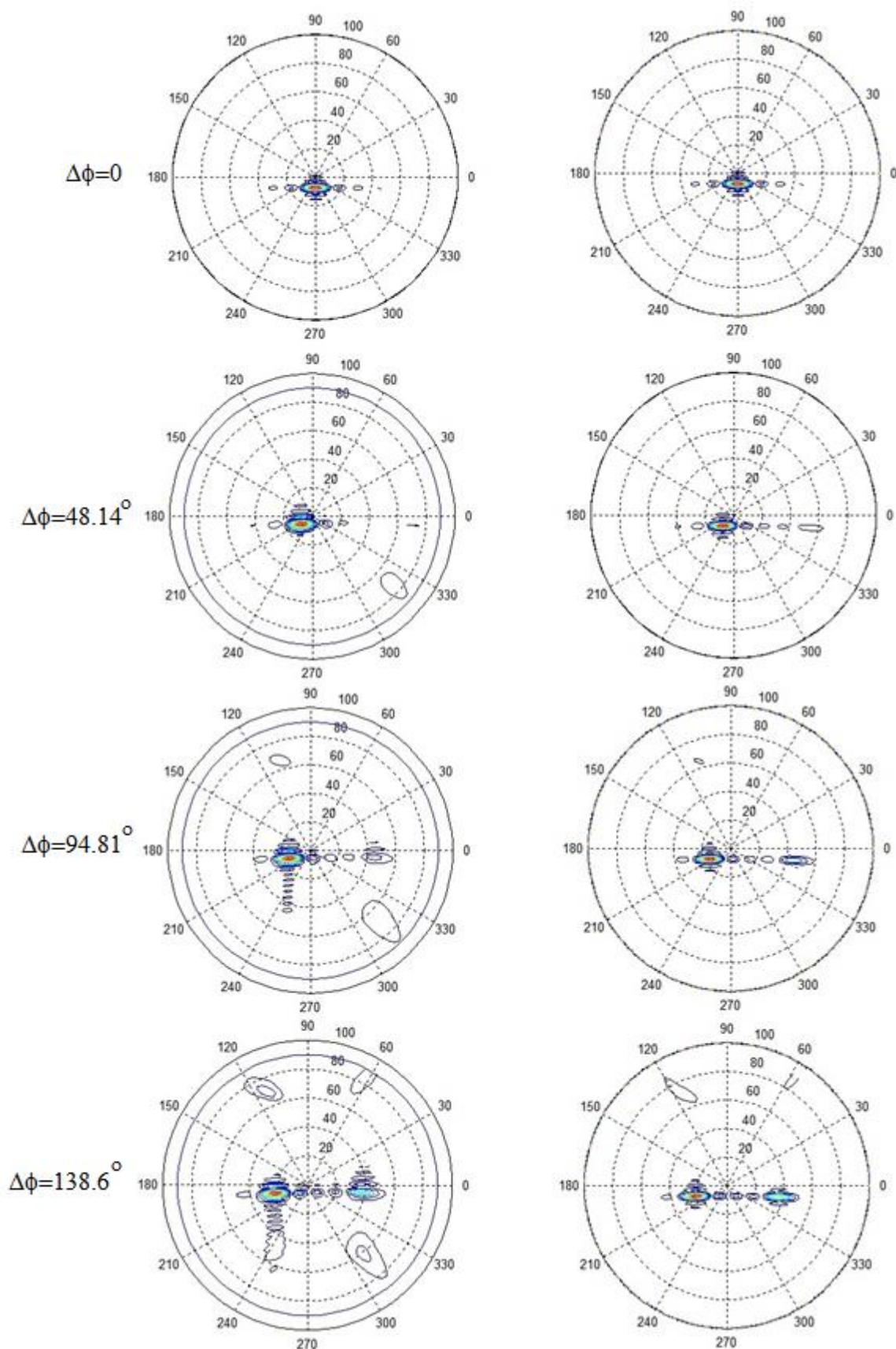
Рис. 17. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=11$ ГГц.



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

Рис. 18. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=12$ ГГц.



а) в сфокусированной решётке

б) в периодической решётке

Рис. 19. Угловое распределение излучения при фазовом сканировании на частоте $f=13$ ГГц.

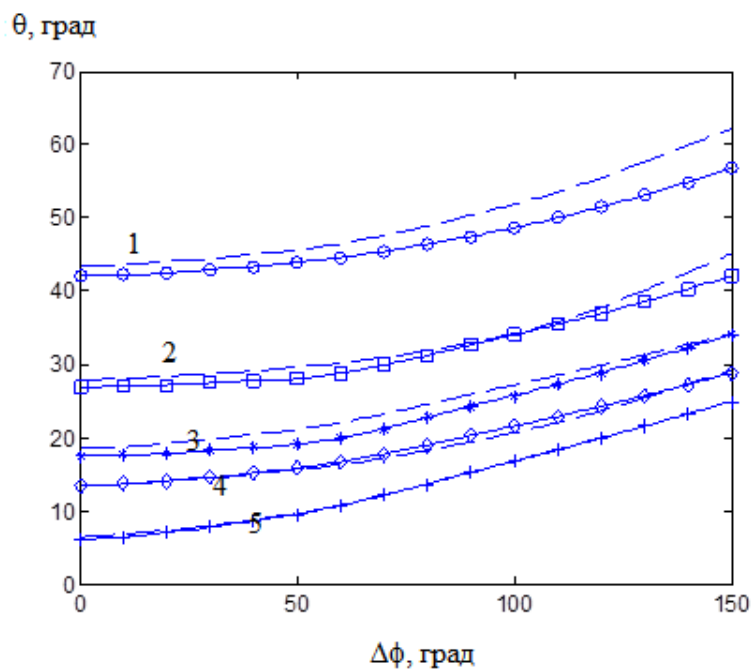
Картина линий уровня амплитуды поля на приведённых рисунках наглядно иллюстрирует смещение фокального пятна, соответствующего основной пространственной гармонике при изменении частоты излучения и фазового сдвига между волноводами, а также появление лучей, соответствующих побочным пространственным гармоникам.

Как видно на рисунках, при синфазном возбуждении волноводов сканирование, как в сфокусированной решётке, так и в периодической, с изменением частоты осуществляется на минус первой пространственной гармонике, и направление главного луча, а также его форма в решётках почти одинаковые. Разница состоит в том, что угловые распределения амплитуды поля над сфокусированной решёткой построены на сферах с различными радиусами.

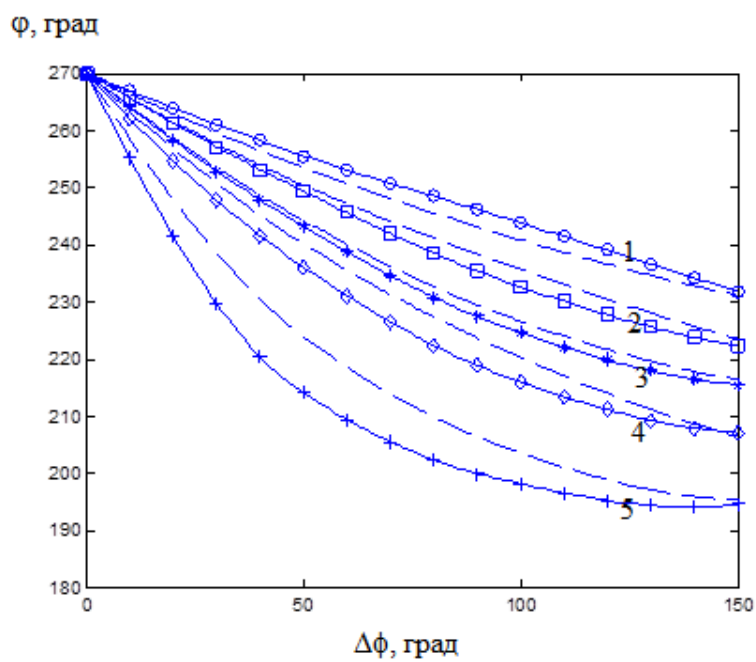
На рис. 20 сплошными линиями приведены зависимости углов θ , φ максимумов излучения сфокусированной решётки, соответствующих основной гармонике на частотах 9, 10, 11, 12, 13 ГГц (кривые 1-5, соответственно) в зависимости от фазового сдвига. Штриховые линии на рисунке относятся к аналогичным характеристикам лучей периодической решётки.

Как видно из рис. 20, между кривыми, характеризующими направления излучения основной гармонике при частотно-фазовом сканировании в указанных диапазонах частот и фазовых сдвигов в рассмотренных решётках, наблюдается хорошее соответствие.

Такое же соответствие можно заметить и для направлений побочных лучей. При этом уровень побочных лучей в сфокусированной решётке меньше, чем в периодической. Этот эффект более подробно иллюстрирует рис. 21, на котором в качестве примера приведены угловые распределения амплитуды поля на частоте 9 ГГц при фазовом сдвиге между волноводами, соответствующем смещению луча в поперечном направлении на угол 10° (рис. 21а соответствует сфокусированной решётке, рис. 21б - периодической). Как видно на рисунке, уровень излучения побочной гармонике в сфокусированной решётке на данной частоте почти на 5 дБ меньше, чем в периодической.

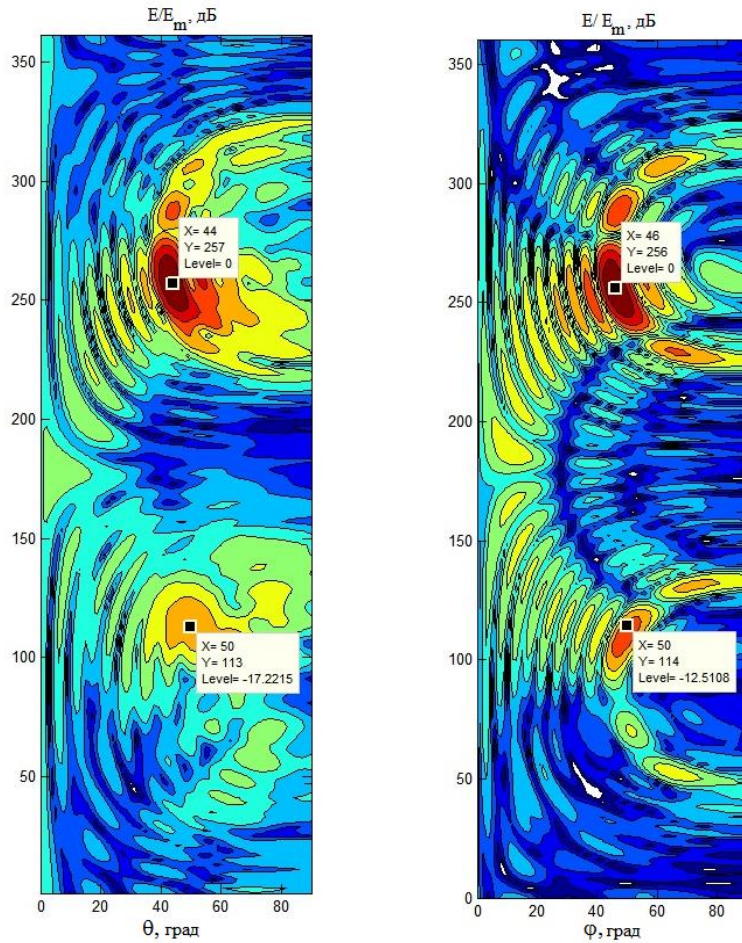


а)



б)

Рис. 20. Зависимость углов θ , ϕ , характеризующих излучение основной гармоники при частотно-фазовом сканировании.



а) в сфокусированной решётке б) в периодической решётке

Рис. 21. Угловые распределения поля излучения решётки на частоте 9 ГГц при фазовом сдвиге между волноводами 48.14°

Интерференционная картина распределения поля периодической решётки более чёткая, в то время как угловое распределение в фокусирующей решётке вне главного фокального пятна более размытое, при этом интенсивность излучения побочных гармоник перераспределяется в виде фонового излучения.

Для двумерной периодической решётки угловые координаты направлений интерференционных максимумов в угловом спектре излучения при частотно-фазовом сканировании определяются соотношениями:

$$\sin \theta = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{k} + \frac{2\pi}{kP_y} n\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi + 2\pi m}{kP_x}\right)^2} \quad (1)$$

$$\sin \varphi = \frac{\frac{\gamma}{k} + \frac{2\pi}{kP_y} n}{\sqrt{\left(\frac{\gamma}{k} + \frac{2\pi}{kP_y} n\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi + 2\pi m}{kP_x}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \frac{\frac{\Delta\phi + 2\pi m}{kP_x}}{\sqrt{\left(\frac{\gamma}{k} + \frac{2\pi}{kP_y} n\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi + 2\pi m}{kP_x}\right)^2}}, \quad (3)$$

где P_y - продольный период решётки, равный расстоянию между щелями вдоль волноводов, P_x - поперечный период, равный размеру широкой стенки волновода (с учётом толщины стенок), k - постоянная распространения волны в свободном пространстве, γ - постоянная распространения волны в волноводе, n, m - номера гармоник в продольном и в поперечном направлениях, соответственно.

Из анализа соотношения (1) следует, что при изменении фазового сдвига в рассматриваемом диапазоне частот помимо гармоники $(-1,0)$ в периодической решётке возможно появление гармоник $(0,0)$ и $(-1,-1)$.

На рисунках 14б-19б основной луч $(-1,0)$ при ненулевом фазовом сдвиге между волноводами характеризуется значениями азимутального угла в интервале $(180^\circ, 270^\circ)$, побочным гармоникам с номером $(0,0)$ соответствуют азимутальные углы в интервале $(90^\circ, 180^\circ)$, в интервале углов $(270^\circ, 360^\circ)$ появляются также гармоники с номером $(-1,-1)$. При этом соотношение (1) достаточно хорошо описывает направления побочных лучей на рисунках при использовании постоянной распространения волны в волноводе с учётом щелей. В решётке с переменным расстоянием между щелями появление подобных побочных гармоник представлялось неочевидным, но, как можно видеть на рис. 14а-19а, названные выше гармоники наблюдаются и в сфокусированной решётке. На частотах близких к центральной частоте и при малых фазовых сдвигах направления излучения данных гармоник в обеих

решётках почти совпадают, однако уровень этих лепестков в сфокусированной решётке значительно меньше, особенно для гармоники (0,0). При больших фазовых сдвигах (например, $\Delta\phi=138.6^\circ$, соответствующего повороту луча на центральной частоте в поперечной плоскости решетки на 30°), наблюдается рост гармоники с номером (-1,-1), и на частоте 9 ГГц уровень этого интерференционного максимума превышает уровень соответствующего максимума периодической решётки.

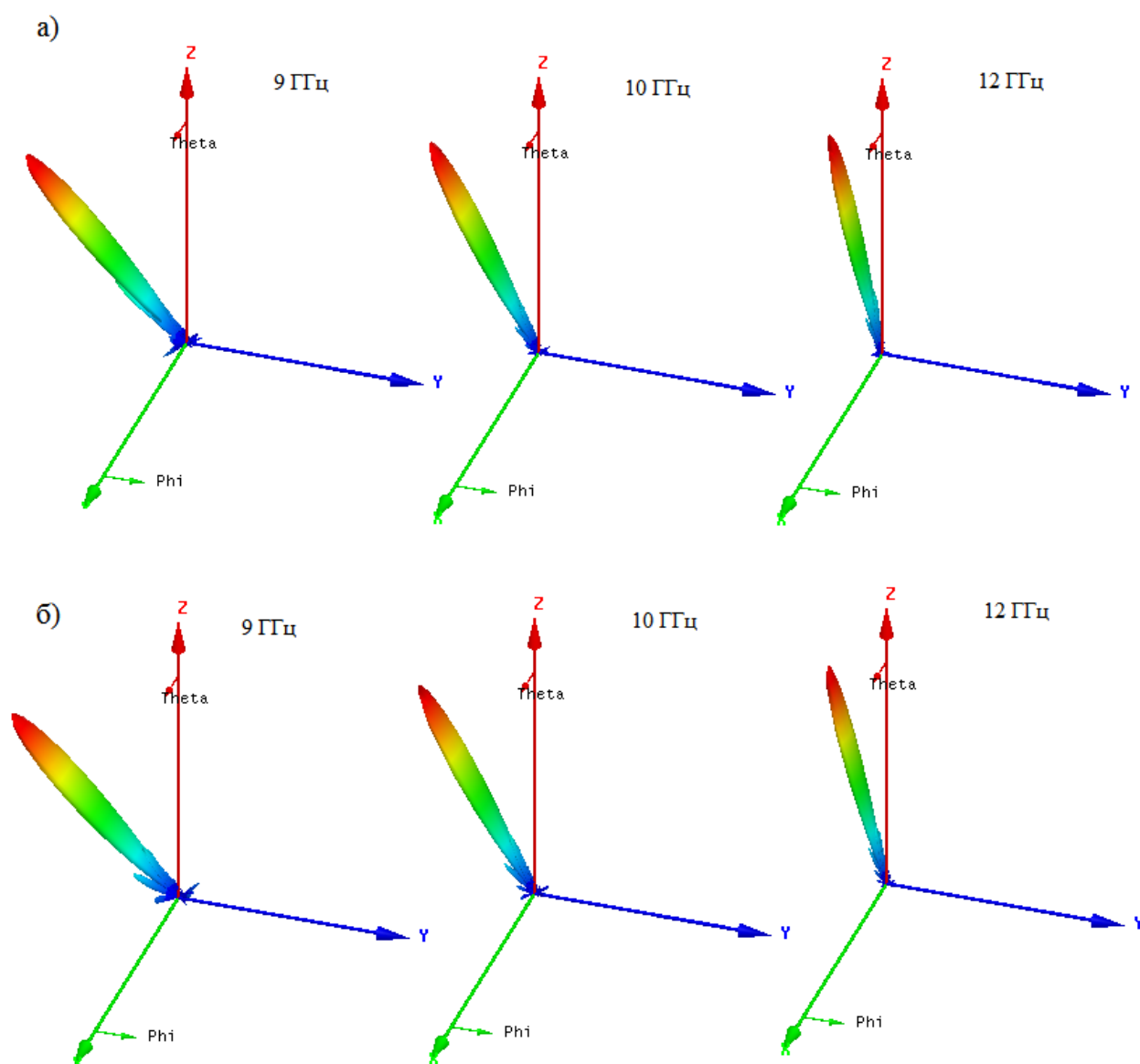


Рис. 22 Угловое распределение амплитуды поля сфокусированной решётки в области фокусировки (а) и диаграммы направленности периодической решётки (б) на частотах 9, 10, 12 ГГц при синфазном возбуждении волноводов ($\Delta\phi=0$)

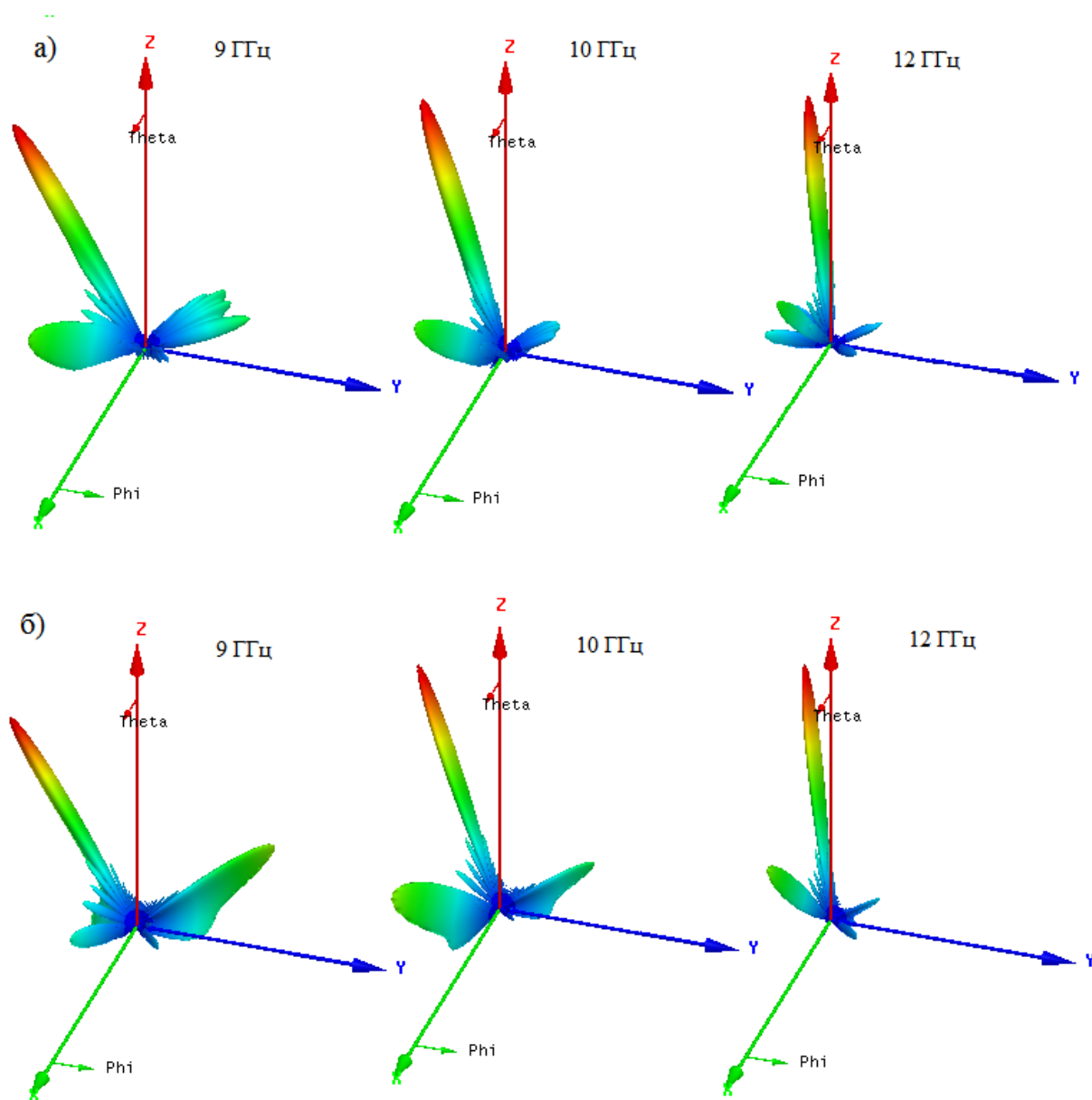


Рис. 23. Угловое распределение амплитуды поля сфокусированной решётки в области фокусировки (а) и диаграммы направленности периодической решётки (б) на частотах 9 ГГц, 10 ГГц, 12 ГГц при сдвиге фаз между волноводами решётки $\Delta\phi=138.6^\circ$.

Более наглядно однолучевой режим работы решёток на частотах 9, 10, 12 ГГц при синфазном возбуждении волноводов виден на рис. 22, где представлены трехмерные диаграммы направленности излучения решёток. Вид

побочных лучей на указанных частотах при большом фазовом сдвиге ($\Delta\phi=138.6^\circ$) в решётках представлен на рис. 23.

Как следует из рисунков, нарушение однолучевого режима работы решётки при больших фазовых сдвигах ограничивает сектор фазового сканирования как в периодической решётке (рис. 23б), так и в сфокусированной решётке с непериодическим распределением щелей (рис. 23а). Одним из способов борьбы с этим эффектом является использование волноводов, заполненных диэлектриком, что позволяет уменьшить размер широкой стенки волновода и тем самым уменьшить поперечный период решётки.

4. Заключение

Приведенные выше характеристики частотно-фазового сканирования в волноводно-щелевой решетке, сфокусированной в зоне Френеля, позволяют оценить перспективы ее использования в составе сканирующего объектива. Два фактора ограничивают возможности такого использования.

Первый из них – возникновение побочных максимумов при увеличении фазового сдвига между волноводами. Это объясняется тем, что диаграмма направленности элемента решетки в виде пары щелей имеет ноль в направлении излучения нулевой гармоники только в плоскости XOZ . При изменении сдвига фазы появляется излучение нулевой гармоники под углом к этой плоскости, а также возникают условия возникновения высших гармоник. Заполнение волноводов диэлектриком подавляет излучение нулевой гармоники, соответствующее уменьшение размера широкой стенки и расстояния между щелями подавляет излучение высших гармоник.

Другой фактор – большой угол наклона фокальной поверхности к плоскости решетки. Эта проблема требует дальнейшего исследования.

Литература

1. Nepa P. Near-Field Focused Antennas for Wireless Communications and Power Transfer International. Spring School on “Electromagnetics and emerging technologies for pervasive applications: Internet of Things, Health and Safety” 18th–20th April, 2016, Bologna, Italy. URL: http://www.cost-ic1301.org/files/TS4_Bologna/2016_04_18_1630_Nepa.pdf.
2. Gómez-Tornero J. L., Goussetis G. 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. URL: http://www.cost-ic1301.org/files/TS1_Aveiro/June_25_2014_1130_Tornero.pdf.
3. Buffi, Nepa P., Manara G. Design criteria for near-field-focused planar arrays, IEEE Antennas Propag. Mag., 2012, vol. 54, no. 1, pp. 40–50.
4. Gomez-Tornero J. L., Quesada-Pereira F., Alvarez-Melcon A., Goussetis G., Weily A. R., and Guo Y. J.. Frequency Steerable Two Dimensional Focusing Using Rectilinear Leaky-Wave Lenses, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, February 2011, pp.407-415.
5. С.Е. Банков, В.А. Калошин, Е.В. Фролова. Синтез и анализ планарной волноводной решётки с частотным сканированием в зоне Френеля. // РЭ. 2016. Т. 61. №6. С. 547.
6. С.Е. Банков, В.И. Калиничев, В.А. Калошин, Е.В. Фролова. Непериодические линейные и планарные антенные решетки вытекающей волны. Докл. 3 Всеросс. Микроволновой конф. "Радиолокация и радиосвязь", 25-27 ноября 2015, М. ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, сс. 207-211.
7. В.И. Калиничев, А.А. Бабаскин. Исследование частотного сканирования волноводно-щелевой решетки с постоянным фазовым сдвигом между волноводами. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2017, №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/7/text.pdf>.

Ссылка на статью:

С. Е. Банков, В. А. Калошин, Е. В. Фролова. Исследование характеристик частотно-фазового сканирования сфокусированной волноводно-щелевой решётки. Журнал радиоэлектроники электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/9/text.pdf>