

## Влияние угла раскрыва плоских коротких щелевых антенн микроволнового диапазона на их излучательные характеристики

В.П. Заярный<sup>1</sup>, С.А. Парпула<sup>1</sup>, В.С. Гирич<sup>1</sup>, И.Н. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет  
400005, Российская Федерация, г. Волгоград  
пр. им. В.И. Ленина, 28

<sup>2</sup> Волгоградский государственный университет  
400062, Российская Федерация, г. Волгоград  
Университетский пр., 100

Изучались характеристики плоских симметричных щелевых антенн осевого излучения, размеры которых соизмеримы с длиной волны излучения ( $\lambda = 30$  мм), имевших линейно расширяющийся раскрыв. При этом теоретически рассчитаны, экспериментально измерены и проанализированы диаграммы направленности исследованных антенн для углов раскрыва  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . Получено хорошее согласование экспериментально измеренных диаграмм направленности исследованных антенн с разработанными математическими моделями на частоте 10 ГГц.

*Ключевые слова:* плоская щелевая антенна, излучатель, диаграмма направленности, микроволновый диапазон, половинная мощность.

В настоящее время продолжается разработка и исследование новых образцов антенн и антенных устройств, которые являются важнейшими функциональными звеньями в радиотехнических системах (РТС). Учитывая существующую тенденцию к исследованию микроволнового диапазона и к миниатюризации РТС, разработка новых антенн с минимизацией их размеров и исследование их электродинамических и излучательных характеристик представляется важным и актуальным.

В данной работе теоретически и экспериментально исследовались диаграммы направленности (ДН) плоских симметричных антенн осевого излучения с линейно изменяющимся раскрывом (рис. 1), длина которых  $L$  была соизмерима с длиной волны излучения. Исследования проводились на частоте  $f_0 = 10$  ГГц (длина волны  $\lambda_0 = 30$  мм), а угол раскрыва антенн изменялся в пределах от  $30^\circ$  до  $120^\circ$  с интервалом  $30^\circ$ . Изменение угла раскрыва антенн производилось с целью изучения его влияния на форму ДН исследованных антенн при их длине, соизмеримой с длиной волны излучения. В данном случае измерение ДН производилось для антенн, длина которых  $L = 1\lambda_0 = 30$  мм (рис. 1), а угол раскрыва  $\alpha$  имел одно из значений в указанных пределах. Мощность и частота излучения при этом остава-

лись неизменными. Измерения проводились на установке, описанной в [1; 2].

Расчет диаграмм направленности для исследованных плоских коротких симметричных антенн, у которых изменение поперечного сечения раскрыва является линейным, производилось с использованием обобщенных модельных представлений, приведенных в [1], модифицированных для случая коротких антенн. В этом случае шаг увеличения ширины щели нерегулярной направляющей структуры (раскрыва антенны [1]) выбирался согласно условию:

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w < \frac{\lambda_0}{4}, \quad (1)$$

где  $w_n$  – ширина щели  $n$ -го регулярного участка направляющей структуры антенны,  $\Delta w$  – шаг увеличения ширины щели нерегулярной направляющей структуры. Это условие оказалось вполне приемлемым для случая коротких антенн. При этом результирующее поле в дальней зоне пространства будет определяться суммированием вклада в излучение, вносимого каждым регулярным участком, согласно выражению [1]:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где  $E_n(\theta, \varphi)$  – вклад в поле дальней зоны  $n$ -м участком,  $\theta, \varphi$  – угловые координаты в

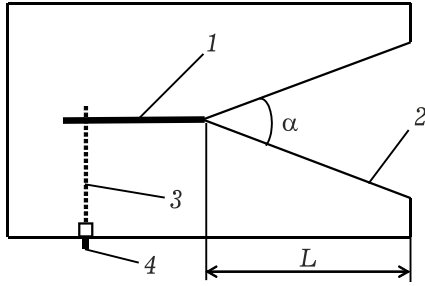


Рис. 1. Внешний вид исследовавшихся антенн: 1 – симметричная щелевая линия; 2 – линейно расширяющийся раскрыв; 3 – питающая микрополосковая линия; 4 – коаксиальный разъем

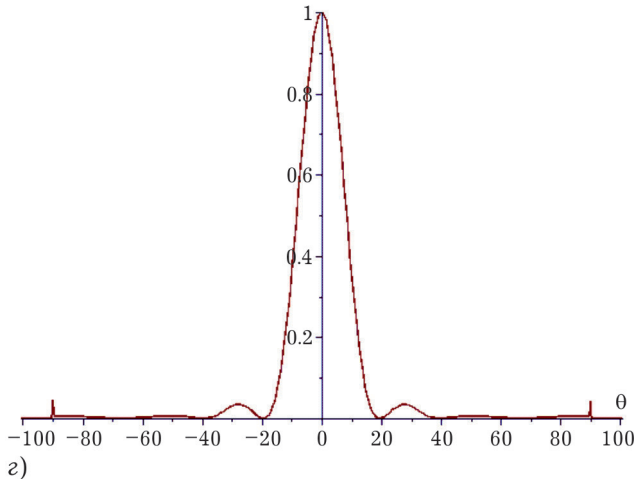
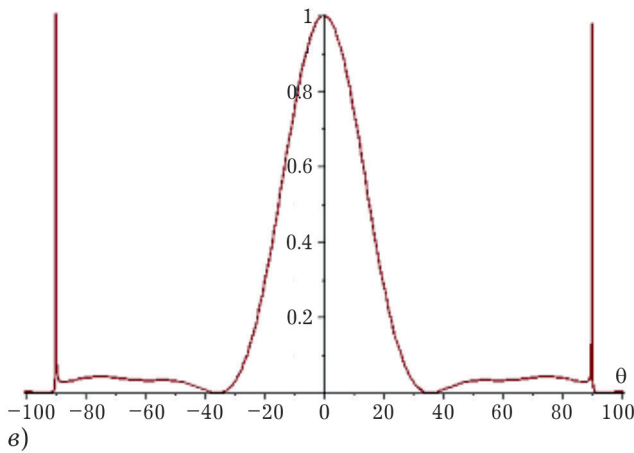
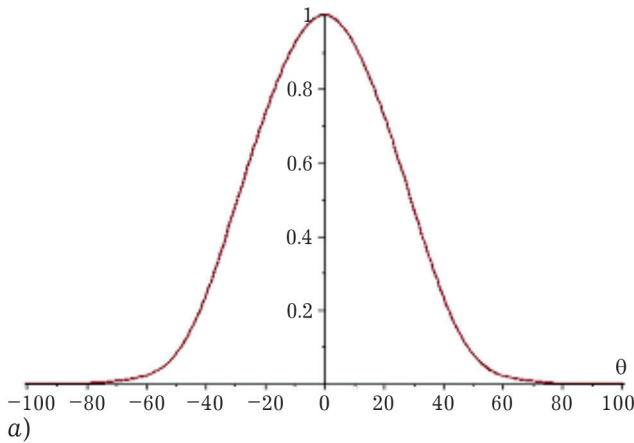


Рис. 2. Рассчитанные диаграммы направленности исследуемых антенн длиной  $L = 30$  мм, для случаев: а)  $\alpha = 60^\circ$ ; б)  $\alpha = 90^\circ$ ; в)  $\alpha = 120^\circ$

$E$ -плоскости и  $H$ -плоскости, соответственно. Условие постоянства мощности, проходящей через каждый регулярный участок направляющей структуры антенны также сохраняется:

$$P_{n-1} = P_n = P_{n+1} = const. \quad (3)$$

Мощность, проходящая вдоль  $n$ -го участка регулярной структуры, определяется согласно формуле

$$P_n = \frac{V_n^2}{Z_n}, \quad (4)$$

где  $V_n$  – разность потенциалов на  $n$ -м регулярном участке, а  $Z_n$  – его волновое сопротивление. Выражение (2), с учетом (3), (4), заменив  $V_n$  на поперечную составляющую поля регулярной симметричной щелевой линией (СЩЛ) и положив  $P_n = 1$ , можно записать [1]:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sqrt{Z_n} E_{0n}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где  $E_{0n}$  – поле излучения  $n$ -го регулярного участка, которое может быть определено по какой-либо модели антенны с щелью постоянной ширины, а  $Z_n$  определяется по формуле [3]:

$$Z_n = \frac{60\pi^2}{\ln\left(\frac{2H}{w} + \sqrt{\left(\frac{2H}{w}\right)^2 - 1}\right)}. \quad (6)$$

Процедура ступенчатой аппроксимации может быть автоматизирована или произведена вручную. В данном случае расчеты показывают, что для изучаемых коротких антенн результаты хорошо сходятся, когда значение  $\Delta w = l_0 / 16$ .

Поперечная компонента электрической составляющей напряженности электромагнитного поля для  $n$ -го регулярного участка антенны определяется следующим выражением [4]:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = \frac{j\omega\epsilon w \sin \varphi e^{-jk_0 r}}{4\pi^2 r} \times \int_{-w/2}^{w/2} \frac{e^{jk_0 z' \cos \theta}}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - z'^2}} dz' \int_0^L e^{jk_0 x' \sin \theta \cos \varphi} \times e^{k_x x'} \left[ 1 + e^{j\frac{\pi}{4} F\left(v\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right)} + \frac{\sqrt{2} e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi}{2} v^2}}{\pi v} \right] dx'. \quad (7)$$

Здесь  $F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt$  – интеграл Френеля,

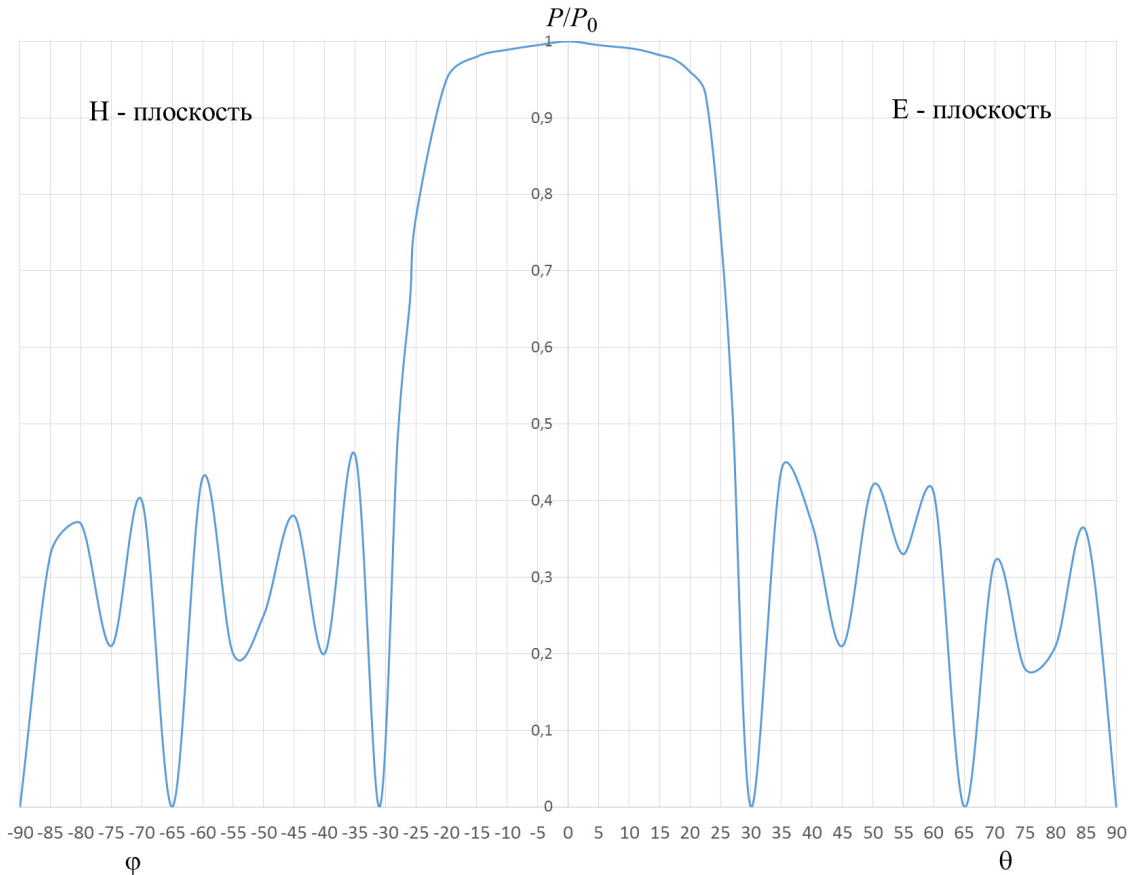


Рис. 3. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для антенны с углом раскрыва  $30^\circ$

$$v = \sqrt{\frac{2k_0 x' \sin \theta (1 + \cos \varphi)}{\pi}}$$

$\omega$  – частота электромагнитных колебаний на входе антенны,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $k_0$  – волновое число,  $r$  – расстояние до рассматриваемой точки в дальней зоне (в нашем случае  $r = 3$  м – расстояние от передающей, до приемной антенны),  $x$  и  $z$  – продольная и поперечная координаты направляющей структуры антенны (соответственно  $x'$  и  $z'$  – параметры интегрирования),  $j$  – мнимая единица,  $t$  – время.

Построение диаграмм направленности в случае постоянной ширины щели (для регулярных участков) в плоскостях  $E$  и  $H$  производится нормированием результатов при  $\varphi = \pi$  – для  $E$ -плоскости и  $\theta = \pi/2$  – для  $H$ -плоскости.

На рис. 2,  $a-v$  приведены диаграммы направленности, полученные в результате моделирования с использованием приведенных выше формул (в  $E$ -плоскости) для случая, когда длина антенны  $L = 30$  мм, а углы раскрыва антенны имели значения  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . Выявлено, что при приближении угла раскрыва  $\alpha$  к значению  $30^\circ$ , форма ДН существенно искажалась, что,

вероятно, свидетельствует о достижении границы применимости разработанной математической модели.

Из графиков, приведенных на рис. 2, видно, что при увеличении угла раскрыва  $\alpha$  исследованных антенн главный лепесток их ДН сужается. Его ширина по уровню половинной мощности составляет: для случая  $\alpha = 60^\circ$ – $52^\circ$ , для случая  $\alpha = 90^\circ$ – $26^\circ$ , а для случая  $\alpha = 120^\circ$ – $16^\circ$ . Следует также отметить, что в данном случае уровень боковых лепестков (УБЛ) не превышает значения 0,05 от максимального значения мощности излучения в направлении главной оси (при  $\theta = 0$ ).

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен ряд натуральных образцов подобных антенн (рис. 1), у которых угол раскрыва  $\alpha$  также изменялся в пределах  $30^\circ$ – $120^\circ$  с интервалом  $30^\circ$ . Питание антенн производилось через коаксиальный разъем аналогично питанию антенн, описанных в [5]. Проектирование исследованных антенн для достижения требуемых электродинамических свойств производилось с учетом основных положений, изложенных в [6–8].

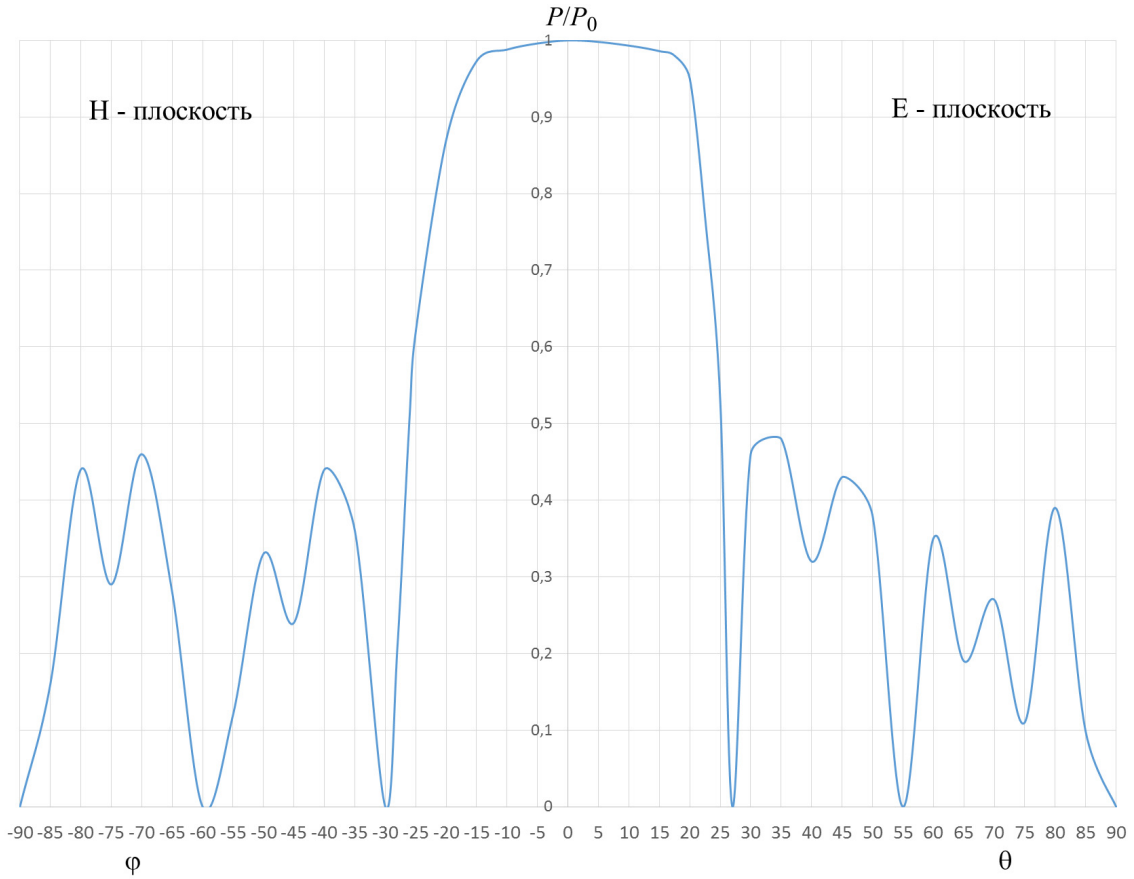


Рис. 4. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для антенны с углом раскрыва  $60^\circ$

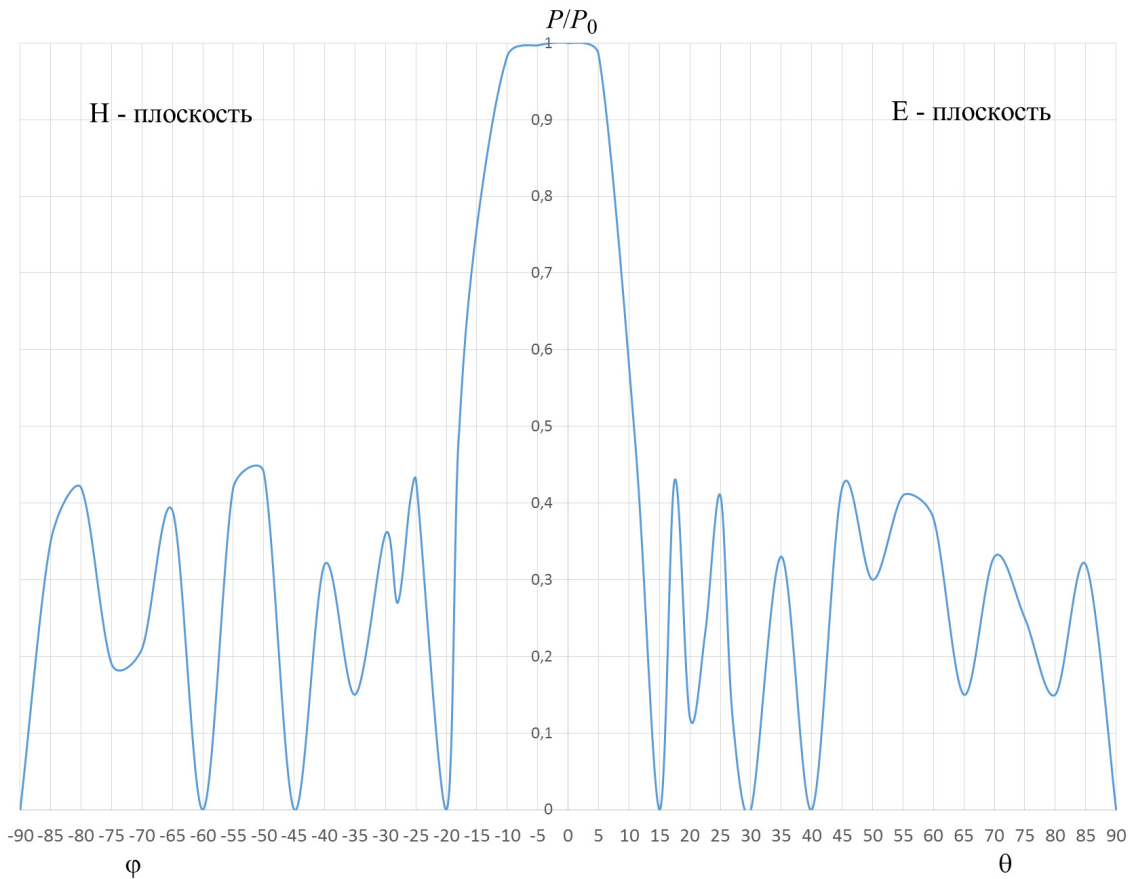


Рис. 5. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для антенны с углом раскрыва  $90^\circ$

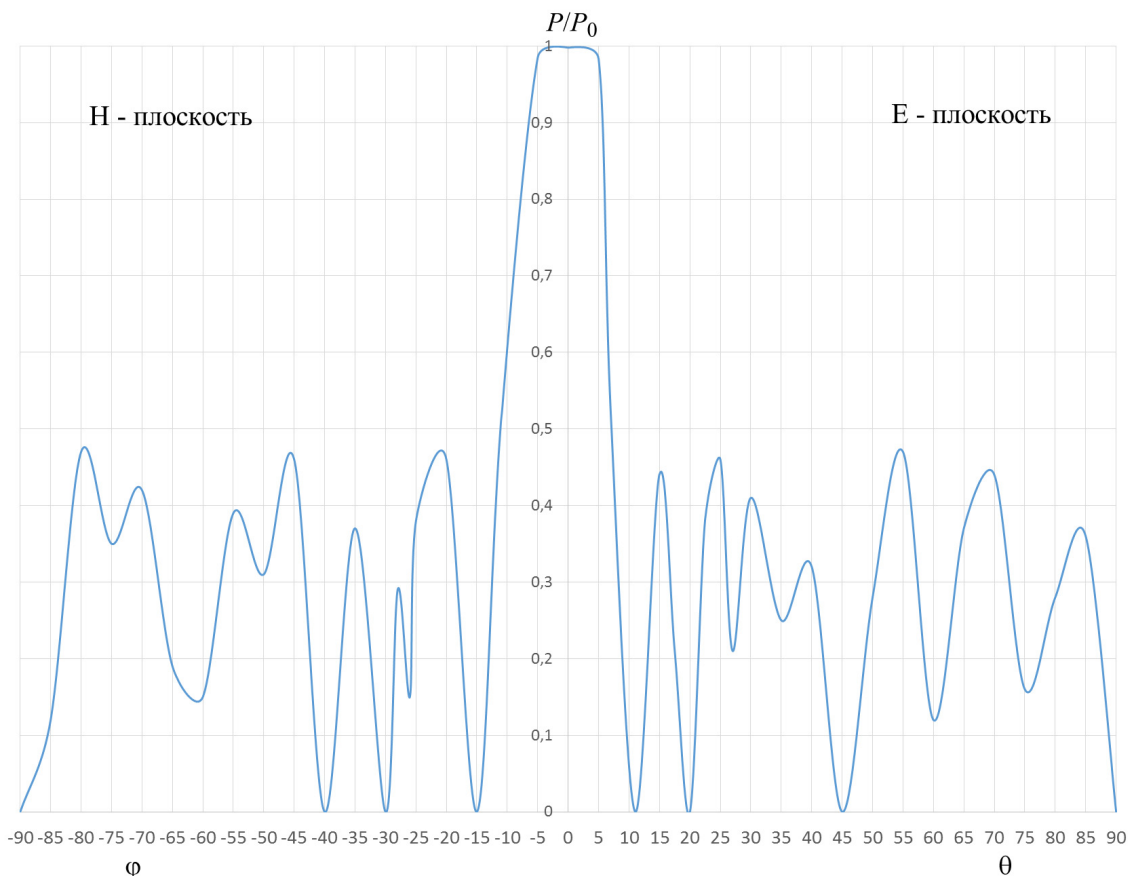


Рис. 6. Экспериментально измеренная диаграмма направленности для антенны с углом раскрыва  $120^\circ$

На рис. 3–6 приведены экспериментально измеренные диаграммы направленности для исследуемых антенн при углах раскрыва, соответственно,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . При этом, исходя из приблизительной симметрии ДН в плоскостях  $E$  и  $H$  (асимметрия, с учетом статистических данных, имела место в пределах  $4^\circ$ ), на рисунках левые половины ДН приведены для плоскости  $H$ , а правые – для плоскости  $E$ .

Во всех случаях ширина ДН в плоскости  $H$  получалась несколько шире, чем в плоскости  $E$ . Из графиков видно, что у экспериментально полученных ДН вершина главного лепестка более протяженная и пологая, чем в случае расчетных ДН, что многократно подтверждалось при проведении экспериментов. Из приведенных графиков также видно, что с увеличением угла раскрыва антенн, главный лепесток ДН в обеих плоскостях сужается, как и в случае расчетных ДН. Для антенн с углом раскрыва  $30^\circ$  ширина ДН по половинной мощности составляла порядка  $54^\circ$  в плоскости  $E$  и порядка  $56^\circ$  в плоскости  $H$ . Для антенн с углом раскрыва  $60^\circ$ , соответственно, порядка  $50^\circ$  в плоскости  $E$  и порядка  $51^\circ$  в плоскости  $H$ . Для антенн с углом раскрыва  $90^\circ$ , соответственно, порядка  $25^\circ$  в плоскости  $E$  и по-

рядка  $36^\circ$  в плоскости  $H$ . Для антенн с углом раскрыва  $120^\circ$  соответственно порядка  $15^\circ$  в плоскости  $E$  и порядка  $19^\circ$  в плоскости  $H$ . Из приведенных результатов следует, что экспериментально измеренные ДН хорошо согласуются с рассчитанными. Уровень боковых лепестков ДН во всех случаях был существенным, но не превышал значения половинной мощности. Высокий УБЛ вероятнее всего объясняется неидеальной формой исследованных антенн и наличием отражения от стенок измерительной камеры.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности использования исследованных антенн в составе более сложных антенных систем, например, в составе антенных решеток, описанных в [5; 9] для их дальнейшего совершенствования.

### Список литературы

1. Исследование плоских симметричных антенн с линейно расширяющимся раскрывом для антенных решеток / С.А. Парпула [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 3. 2013. С. 44–49.
2. Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.

3. Sharma A.K., Wilson R.M., Rosen A. An experimental investigation of millimeter-wave fin antennas // IEEE Antennas & Propagation Society APS. 1985. Vol. 6. P. 97–100.
4. Janaswamy R., Schaubert D.H., Pozar D.M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // Radio Science. 1986. Vol. 21. № 5. P. 797–804.
5. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. // Известия вузов «Радиофизика». 2012. Т. 55. № 10–11. С. 697–703.
6. Неганов В.А., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика / под ред. В.А. Неганова. Т. 1. М.: Радио и связь. 2000. 509 с.
7. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн. Учебное пособие для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
8. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайневых частот. М.: Наука. Физматлит, 1996. 304 с.
9. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Антенна кругового обзора. Патент на полезную модель № 103676. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 апреля 2011 г.

## The effects of aperture angle on the electrodynamic characteristics of the planar short slot antenna microwave band

*V.P. Zayarnyi, S.A. Parpula, V.S. Girich, I.N. Ponomarev*

Characteristics of symmetric planar slot antennas of axial radiation, the size of which is comparable with the radiation wavelength ( $\lambda = 30$  mm) having a linearly extending opening was studied. The same directional diagram investigated antennas have been theoretically calculated, experimentally measured and analyzed for Aperture angle of  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $120^\circ$ . Experimentally measured directional diagram of the antennas (at frequencies of 10 GHz) are in good agreement with the developed mathematical models.

*Keywords:* planar slot antenna, radiating element, directional diagram, microwave band, half power.

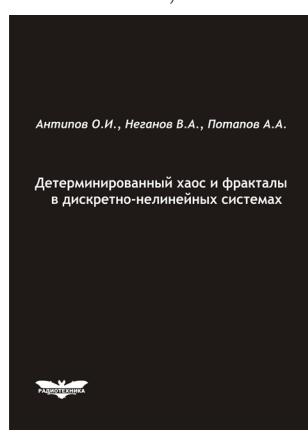
**Антипов, О.И.**

**Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах /** О.И. Антипов, В.А. Неганов, А.А. Потапов. – М.: Радиотехника, 2009. – 235 с., ил.

**ISBN 978-5-88070-237-4**

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96



В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер.

Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

*Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.*