

УДК 537.876+621.39

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛА РАСКРЫВА ПЛОСКИХ КОРОТКИХ ЦЕЛЕВЫХ АНТЕНН МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА НА ИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В. П. Заярный^{1*}, С. А. Парпула¹, В. С. Гирич¹, И. Н. Пономарёв²

¹ Волгоградский государственный технический университет;

² Волгоградский госуниверситет, г. Волгоград, Россия

Изучены характеристики плоских симметричных целевых антенн с линейно расширяющимся раскрывом, размеры которых соизмеримы с длиной волны излучения 30 мм. При этом теоретически рассчитаны, экспериментально измерены и проанализированы диаграммы направленности исследованных антенн для углов раскрыва 60° , 90° и 120° . Выявлено влияние угла раскрыва антенн на их коэффициент направленного действия. Получено хорошее согласование экспериментально измеренных диаграмм направленности антенн на частотах (10 ± 2) ГГц с разработанными математическими моделями.

ВВЕДЕНИЕ

Антенны и антенные устройства являются важнейшими функциональными звеньями в радиотехнических системах, поэтому в настоящее время продолжают развиваться разработка и исследование новых образцов антенн. В силу существующих тенденций применения микроволн и уменьшения размеров радиотехнических систем разработка новых антенн, минимизация их размеров и исследование их электродинамических и излучательных характеристик представляются важными и актуальными.

В данной работе теоретически и экспериментально исследовались диаграммы направленности (ДН) плоских симметричных антенн с линейно изменяющимся раскрывом¹, длина которых была соизмерима с длиной волны излучения λ_0 . Вид таких антенн представлен на рис. 1 и 2. В процессе моделирования нерегулярный (линейно расширяющийся) раскрыв антенны аппроксимировался последовательностью регулярных участков с постоянной шириной (см. рис. 1). Для каждого из них рассчитывалось поле излучения, а результирующее поле в дальней зоне (точка $P(r, \theta, \varphi)$ на рис. 2) представлялось суммой полей от каждого регулярного излучателя.

Исследования проводились в окрестности частоты излучения $f_0 = (10 \pm 2)$ ГГц, а угол раскрыва антенн изменялся в пределах от 60° до 120° с интервалом 30° . Изменение этого угла проводилось с целью изучения его влияния на форму ДН исследованных антенн, при этом измерение ДН проводилось для антенн, длина которых равна $L = \lambda_0 = 30$ мм (см. рис. 1), а угол раскрыва α имел одно из значений в указанных выше пределах. Мощность и частота излучения в процессе измерений оставались неизменными. Измерения проводились на установке, описанной в работах [1, 2].

По экспериментальным данным также была получена и проанализирована зависимость коэффициента направленного действия (КНД) исследованных антенн от угла раскрыва.

* zvp2000@mail.ru

¹ Т. е. с шириной раскрыва, линейно растущей с увеличением координаты вдоль антенны.

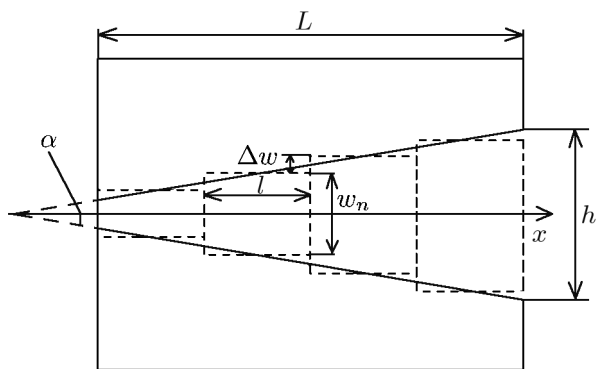


Рис. 1. Исследуемая плоская щелевая антенна и её аппроксимация регулярными участками

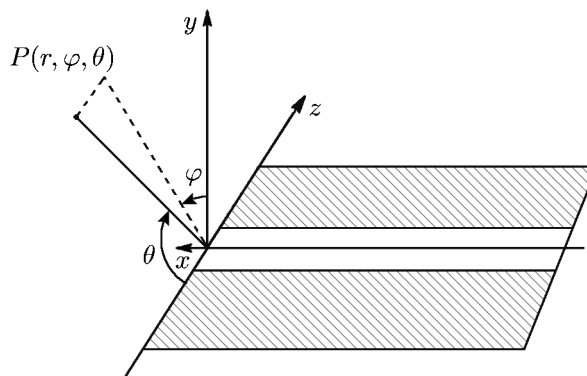


Рис. 2. Излучатель с щелью постоянной ширины в системе координат с началом у излучающей кромки

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЛОСКИХ КОРОТКИХ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН С ЛИНЕЙНО РАСШИРЯЮЩИМСЯ РАСКРЫВОМ

Расчёт диаграмм направленности для исследовавшихся плоских коротких симметричных антенн, у которых изменение ширины поперечного сечения раскрыва является линейным, проводилось с использованием обобщённых модельных представлений [1], модифицированных для случая коротких антенн. В этом случае шаг Δw увеличения ширины регулярной щели нерегулярной направляющей структуры (раскрыва антенны, см. рис. 1) выбирался согласно условию

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w < \lambda_0/4, \tag{1}$$

где w_n — ширина щели n -го регулярного участка направляющей структуры антенны. Это условие оказалось вполне приемлемым для случая коротких антенн. Результирующее электрическое поле излучения в дальней зоне пространства определяется суммой полей с напряжённостями $E_n(\theta, \varphi)$ от каждого регулярного участка антенны согласно выражению [1]

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

где θ и φ — угловые координаты в E - и H -плоскостях соответственно. Мощность излучения, проходящего через каждый регулярный участок направляющей структуры антенны, одинакова

$$P_{n-1} = P_n = P_{n+1} = \text{const}. \tag{3}$$

Мощность излучения, проходящего вдоль n -го участка регулярной структуры, определяется формулой

$$P_n = V_n^2/Z_n, \tag{4}$$

где V_n — разность потенциалов на n -м регулярном участке, Z_n — его волновое сопротивление. Выразив V_n через поперечную составляющую поля регулярной симметричной щелевой линии и положив $P_n = 1$, выражение (2) с учётом (3) и (4) можно записать как [1]

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

где E_{0n} — напряжённость электрического поля излучения от n -го регулярного участка, которое может быть определено с помощью модели антенны с щелью постоянной ширины, а величина Z_n определяется по формуле [3]

$$Z_n = \frac{60\pi^2}{\ln[2h/w_n + \sqrt{(2h/w_n)^2 - 1}]}, \quad (6)$$

где h — линейный размер раскрыва антенны (см. рис. 1).

Процедура ступенчатой аппроксимации может быть автоматизирована или проведена вручную. В данном случае расчёты показывают, что для изучаемых коротких антенн численная схема хорошо сходится при $\Delta w = \lambda_0/16$.

Поперечная компонента напряжённости электрического поля для n -го регулярного участка антенны определяется выражением [4]

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

Здесь $F(\nu) = \int_0^\nu \exp(-jt^2) dt$ — интеграл Френеля,

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

ω — круговая частота электромагнитных колебаний на входе антенны, ε — диэлектрическая проницаемость, k_0 — волновое число, r — расстояние до рассматриваемой точки в дальней зоне (в нашем случае $r = 3$ м — расстояние от передающей до приёмной антенны), x и z — продольная и поперечная координаты направляющей структуры антенны соответственно, k_x — величина проекции волнового вектора на ось x .

Построение диаграмм направленности в случае постоянной ширины щели (для регулярных участков) в E - и H -плоскостях проводится нормированием результатов при $\theta = \pi$ и $\varphi = \pi/2$ соответственно. Интегралы в расчётных формулах находились численно.

На рис. 3–5 приведены диаграммы направленности (штриховые линии), полученные в результате моделирования с использованием приведённых выше формул (в E -плоскости) при $L = 30$ мм, $\alpha = 60^\circ$, 90° и 120° . Из этих графиков видно, что при увеличении угла раскрыва α главный лепесток ДН сужается. Ширина последнего по уровню половинной мощности составляет 52° , 26° и 16° для $\alpha = 60^\circ$, 90° и 120° соответственно. Следует также отметить, что в данном случае уровень боковых лепестков не превышает 0,05 от максимальной мощности излучения в направлении главной оси (т. е. при $\theta = 0$).

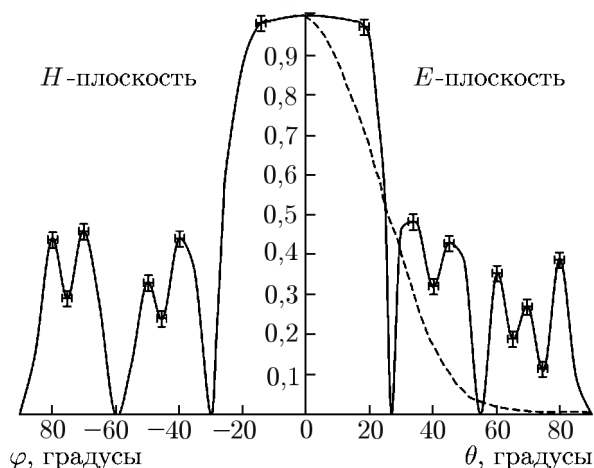


Рис. 3. Расчётная (в E -плоскости, штриховая линия) и экспериментально измеренная (в E - и H -плоскостях, сплошная линия) диаграммы направленности для антенны с углом раскрыва 60°

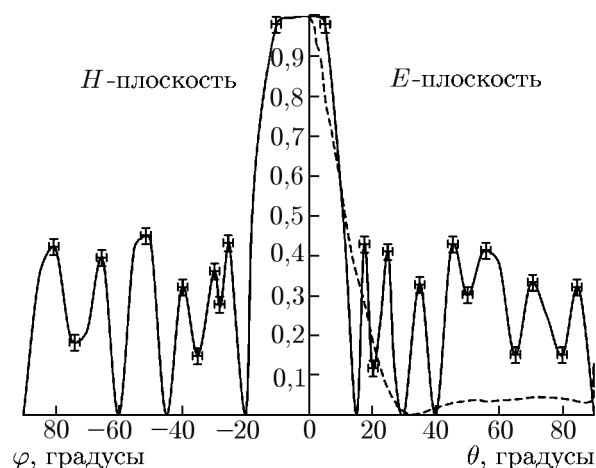


Рис. 4. Расчётная (в E -плоскости, штриховая линия) и экспериментально измеренная (в E - и H -плоскостях, сплошная линия) диаграммы направленности для антенны с углом раскрыва 90°

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПЛОСКИХ КОРОТКИХ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН С ЛИНЕЙНО РАСШИРЯЮЩИМСЯ РАСКРЫВОМ

Для проведения натурального эксперимента был изготовлен ряд опытных образцов плоских симметричных щелевых антенн с линейно расширяющимся раскрывом (рис. 1), у которых угол раскрыва α изменялся в пределах $60^\circ \div 120^\circ$ с интервалом 30° . Питание к антеннам подводилось через коаксиальный разъём, как описано в работе [5].

На рис. 3, 4 и 5 приведены экспериментально измеренные диаграммы направленности для исследуемых антенн при углах раскрыва 60° , 90° и 120° соответственно (экспериментально полученные ДН исследовавшихся антенн совмещены с соответствующими расчётными графиками для удобства сравнения). При этом в силу приблизительной симметрии ДН в E - и H -плоскостях (асимметрия по статистическим данным имела место в пределах 4°) на экспериментальных графиках левые половины ДН приведены для H -плоскости, а правые — для E -плоскости. Во всех случаях ширина ДН в H -плоскости получалась несколько больше, чем в E -плоскости. Следует отметить, что у экспериментально полученных ДН вершина главного лепестка более протяжённая и пологая, чем в случае расчётных ДН. Это многократно подтверждалось в экспериментах. Из приведённых графиков также видно, что с увеличением угла раскрыва антенн главный лепесток ДН в обеих плоскостях сужается (как для полученных экспериментально, так и для расчётных ДН). Для антенн с углом раскрыва 60° ширина ДН по половинной мощности составляла порядка 50° в E -плоскости и порядка 51° в H -плоскости, для антенн с углом раскрыва 90° — порядка 25° в E -плоскости и порядка 36° в H -плоскости, для антенн с углом раскрыва 120° — порядка 15° в E -плоскости и порядка 19° в H -плоскости. Из приведённых результатов следует, что экспериментально измеренные ДН по уровню половинной мощности (для E -плоскости) хорошо согласуются с рассчитанными. Эксперимент также показал, что форма ДН в диапазоне частот $8 \div 12$ ГГц существенно не изменялась. Уровень боковых лепестков экспериментально полученных ДН во всех случаях был выше, чем для расчётных ДН, но не превышал половинной мощности главного лепестка. Высокий уровень боковых лепестков, вероятнее всего, объясняется неидеальной формой исследовавшихся антенн и отражением от стенок измерительной камеры.

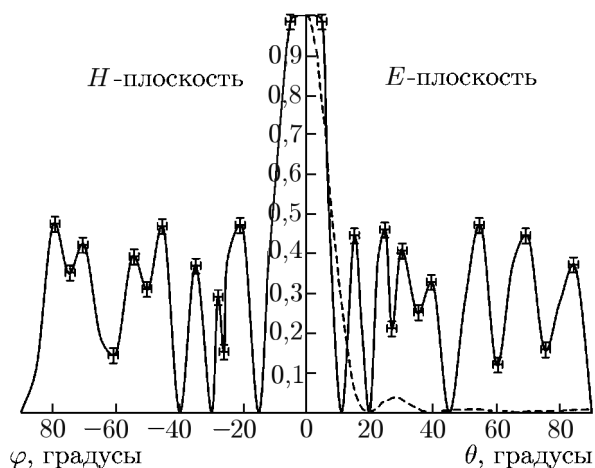


Рис. 5. Расчётная (в E -плоскости, штриховая линия) и экспериментально измеренная (в E - и H -плоскостях, сплошная линия) диаграммы направленности для антенны с углом раскрыва 120°

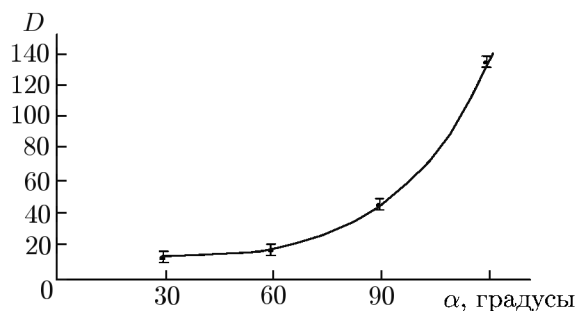


Рис. 6. Зависимость КНД исследовавшихся антенн от угла раскрыва

По полученным экспериментальным данным также была построена зависимость КНД исследовавшихся антенн от угла их раскрыва (рис. 6) с использованием известного соотношения

$$D = 41\,253 / (\Theta_{0,5}[\text{градусы}] \varphi_{0,5}[\text{градусы}]),$$

где $\Theta_{0,5}[\text{градусы}]$ и $\varphi_{0,5}[\text{градусы}]$ — ширина ДН в E - и H -плоскостях по уровню половинной мощности соответственно. Из графика на рис. 6 видно, что при увеличении угла раскрыва антенны её КНД увеличивается нелинейно, резко нарастая в области больших углов раскрыва ($\alpha > 70^\circ$). Учитывая, что коэффициент полезного действия подобных антенн $\eta = 0,6 \div 0,8$, а их коэффициент усиления $K = \eta D$, нетрудно установить зависимость коэффициента усиления от угла раскрыва, характер которой будет таким же, как на рис. 6.

Полученные результаты также свидетельствуют о возможности использования исследовавшихся антенн в составе более сложных антенных систем, например в составе антенных решёток, описанных в работах [5, 6].

ВЫВОДЫ

В данной работе для плоских симметричных щелевых антенн микроволнового диапазона с линейно расширяющимся раскрывом, размеры которых соизмеримы с длиной волны излучения ($\lambda_0 = 30$ мм), построены математические модели для расчёта ДН для случаев, когда угол раскрыва антенн принимал значения 60° , 90° и 120° . Установлено, что с увеличением угла раскрыва ширина главного лепестка ДН уменьшается, а уровень боковых лепестков не превышает 0,1 от максимальной мощности излучения в направлении главной оси. Результаты эксперимента для аналогичных натуральных образцов антенн показали, что зависимость их ДН от угла раскрыва такая же, что и для расчётных ДН, т. е. с увеличением угла раскрыва ширина главного лепестка ДН уменьшается. При этом уровень боковых лепестков у экспериментально измеренных ДН существенно выше, чем у расчётных, что объясняется неидеальностью условий эксперимента. Следует отметить, что экспериментально измеренные ДН хорошо согласуются с рассчитанными ДН по уровню половинной мощности. Полученная зависимость КНД исследовавшихся антенн от угла раскрыва показала, что при увеличении этого угла КНД антенны увеличивается нелинейно, резко возрастая в области больших углов раскрыва ($\alpha > 70^\circ$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 328.
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. // IEEE Anten. Propag. Soc. 1985. V. 6. P. 97.
4. Janaswamy R., Schaubert D. // IEEE Trans. Anten. Propag. 1987. V. 35. P. 1058.
5. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10–11. С. 697.
6. Пат. 103676 РФ, МПК H01Q3/08. Антенна кругового обзора / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный. Опубл. 20.04.2011. Бюл. № 11.

Поступила в редакцию 22 июня 2015 г.; принята в печать 6 апреля 2016 г.

STUDIES OF THE INFLUENCE OF APERTURES OF PLANAR SHORT SLOT MICROWAVE ANTENNAS ON THEIR ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS

V. P. Zayarny, S. A. Parpula, V. S. Girich, and I. N. Ponomaryev

We have studied the characteristics of planar symmetric slot antennas with linearly expanding apertures, whose dimensions are comparable with a radiation wavelength of 30 mm. In doing this, we have calculated experimentally, measured experimentally, and analyzed the radiation patterns of the antennas under consideration for apertures of 60°, 90°, and 120°. The influence of the antenna aperture on the directive gain of the antennas was discovered. The experimentally measured antenna radiation patterns at the frequencies (10 ± 2) GHz were found to agree well with the developed mathematical models.