

Особенности характеристик диаграмм направленности плоских щелевых антенн микроволнового диапазона с линейно расширяющимся раскрытием

В.П. Заярный¹, Е.И. Нефёдов², С.А. Парпула¹, И.Н. Пономарев³

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

² Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141190, Российская Федерация, Московская обл., г. Фрязино
пл. Введенского, 1

³ Волгоградский государственный университет
400062, Российская Федерация, г. Волгоград
Университетский пр., 100

Для плоских симметричных щелевых антенн микроволнового диапазона (центральная частота $f_0 = 10$ ГГц), имеющих линейный раскрыт постоянной длины ($5\lambda_0 = 150$ мм), расчетным и опытным путем получены диаграммы направленности в плоскостях E и H для углов раскрытия 10° , 22° , 30° , 34° и 60° . На основе полученных опытных данных установлены границы применимости модельных представлений для исследовавшихся антенн. На границах частотного диапазона (6–12) ГГц они оставались практически неизменными.

Ключевые слова: плоская симметричная щелевая антенна, линейно изменяющийся раскрыт, микроволновый диапазон, диаграмма направленности, ширина луча по половинной мощности.

Введение

Антенны и антенные устройства в радиотехнических системах являются функциональными звеньями, характеристики которых в значительной степени определяют их свойства. Поэтому разработка антенн на основе новых базовых элементов и исследование их характеристик является важным и актуальным [1].

В данной работе исследовались особенности характеристик диаграмм направленности (ДН)

плоских антенн осевого излучения, выполненных в виде линейно расширяющихся симметричных щелевых линий (рис. 1).

Для них экспериментально и теоретически определялись ДН в плоскостях E и H при изменении углов раскрытия α в достаточно широких пределах (от 10° до 60°). Длина раскрытия исследовавшихся антенн L всегда оставалась постоянной ($L = 150$ мм), а рабочая частота изменялась в диапазоне (6–12) ГГц, при этом центральной являлась частота $f_0 = 10$ ГГц.

1. Анализ расчетных диаграмм направленности исследовавшихся антенн

Диаграммы направленности для указанных антенн рассчитывались по методике, использованной в [2; 3; 5; 6], предполагающей аппроксимацию линейно расширяющегося раскрытия антенны регулярными участками длиной l , шириной w_0 . При этом шаг увеличения нерегулярного раскрытия Δw (см. рис. 1) выбирался согласно условию:

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

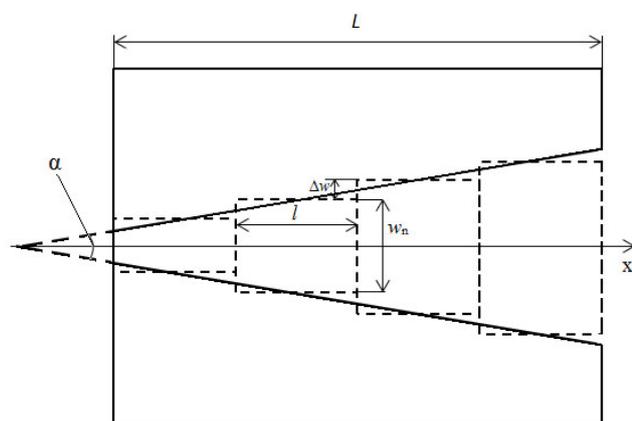


Рис. 1. Исследуемая плоская антенна осевого излучения и ее аппроксимация регулярными участками

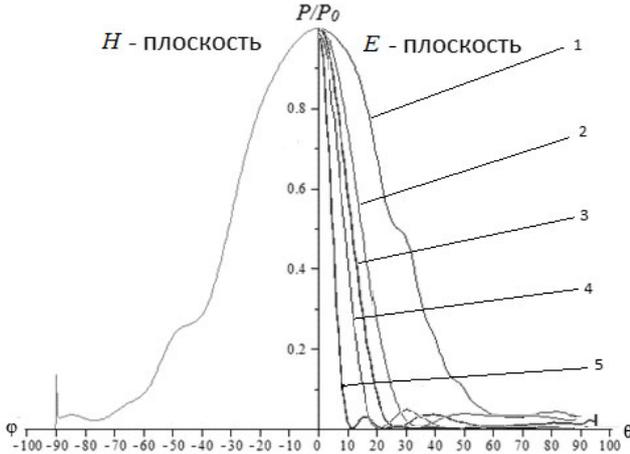


Рис. 2. Семейство расчетных ДН в плоскостях E и H для углов раскрыва α равных 10°, 22°, 30°, 34° и 60° (соответственно, графики 1, 2, 3, 4 и 5)

Обоснование модельных представлений для данного случая произведено в [2; 3; 5; 6] и использовалось в данной работе в виде:

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

Здесь

$$F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt$$

– интеграл Френеля,

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

– аргумент интеграла Френеля. $E_n(\theta, \varphi)$ – вклад в поле дальней зоны n-м регулярным участком, θ, φ – угловые координаты в E-плоскости и H-плоскости ДН, соответственно, ω – угловая 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 приемной антенн), x и z – продольная и поперечная координаты направляющей структуры антенны (соответственно x' и z' – параметры интегрирования), j – мнимая единица. Следует отметить, что в формировании основной компоненты поля в плоскости H при $\theta = \pi/2$ и $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ в (2) участвуют все три слагаемых диадной функции

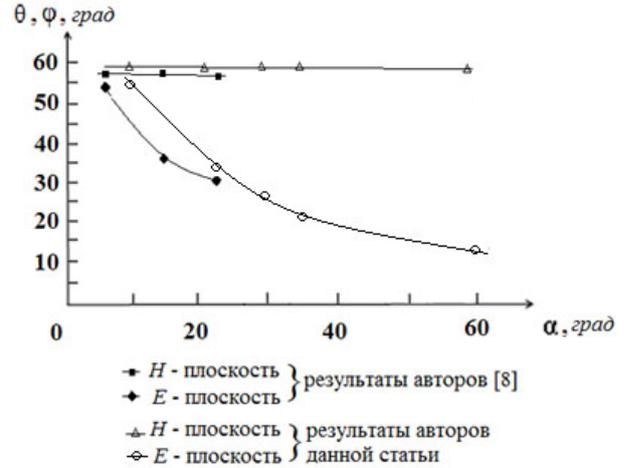


Рис. 3. Графики зависимостей ширины главного луча расчетных ДН в плоскостях E и H по половинной мощности от угла раскрыва антенн, полученные авторами [8] и данной статьи

Грина во внутреннем интеграле по dx' , а в плоскости E при $\varphi = \pi$ и $0 < \theta < \pi$ – только первое и третье слагаемые, так как интеграл Френеля $F(v)$ обращается в ноль в этой плоскости. Данные модельные представления получены для случая бесконечной идеальной полуплоскости, возбуждаемой щелью, которая прорезана перпендикулярно ее краю [4].

Расчеты ДН производились для исследованных антенн, длина которых имела постоянную величину $L = 5\lambda_0$ (на частоте $f_0 = 10$ ГГц длина волны будет $\lambda_0 = 30$ мм), а угол раскрыва излучающей структуры изменялся в пределах $\alpha = 10^\circ - 60^\circ$. На рис. 2 приведено семейство нормированных по мощности расчетных ДН в плоскостях E и H для случаев, когда углы раскрыва α имели фиксированные значения 10°, 22°, 30°, 34° и 60° (углы раскрыва для расчетных ДН были взяты в соответствии с углами раскрыва опытных образцов антенн).

Из графиков видно, что ширина ДН по уровню половинной мощности в плоскости E с увеличением угла линейного расширения щели α в указанных пределах изменяется в пределах $54^\circ - 21^\circ$, т. е. уменьшается, что подтверждалось ранее в аналогичных исследованиях [5–7] и является прогнозируемым. При этом в плоскости H ширина ДН по уровню половинной мощности при указанном изменении угла раскрыва α остается неизменной и имеет значение 59° .

Зарубежными исследователями для подобных антенн в [8] были получены аналогичные результаты для значений углов раскрыва 7°, 15° и 22°. На рис. 3 приведены сравнительные данные зависимости ширины главного луча ДН в пло-

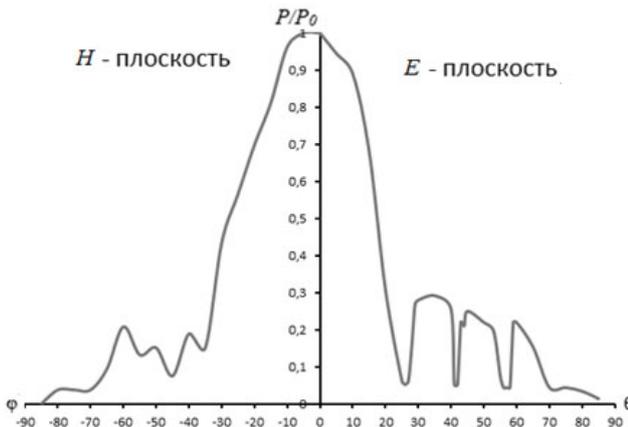


Рис. 4. Измеренная диаграмма направленности исследованных антенн для угла раскрыва $\alpha = 10^\circ$

скостях E (угол θ) и H (угол φ) по половинной мощности, полученные авторами [8] и в наших работах.

Из приведенных данных следует, что результаты, полученные нами и в [8] хорошо согласуются друг с другом (в [8] угол раскрыва антенн увеличивался только до величины $\alpha = 22^\circ$). С увеличением угла линейного расширения щели α , ширина главного лепестка ДН в плоскости H в обоих случаях остается неизменной даже, когда в нашем случае угол раскрыва α увеличивался до 60° (по половинной мощности в [8] она составляла 57° , в нашем случае – 59°).

В плоскости E характер зависимости ширины главного лепестка ДН от угла раскрыва антенны в более широком диапазоне его, чем в [8], подтверждается также нашими предыдущими работами [2; 5–7] и является ожидаемым.

2. Результаты опытов и их анализ

Для проверки полученных расчетных данных авторами произведены опытные исследования антенн, аналогичных исследовавшимся теоретически. С этой целью был изготовлен набор плоских симметричных щелевых антенн, у которых так же, как и при моделировании, угол раскрыва α имел значения 10° , 22° , 30° , 34° и 60° , а длина раскрыва составила $L = 5\lambda_0$ ($\lambda_0 = 30$ мм) для всех исследовавшихся образцов. Антенны выполнялись из металлической фольги на тонкой пенопластовой подложке ($\epsilon \approx 1$), с учетом их электродинамических и геометрических особенностей, а также рекомендаций, приведенных в [9; 10]. Питание антенн осуществлялось по методике, описанной в [6]. Измерение их диаграмм направленности производилось на установке, описанной в [4; 11].

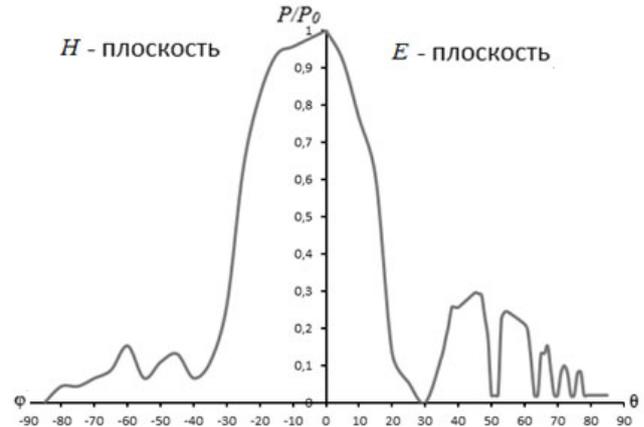


Рис. 5. Измеренная диаграмма направленности исследованных антенн для угла раскрыва $\alpha = 22^\circ$

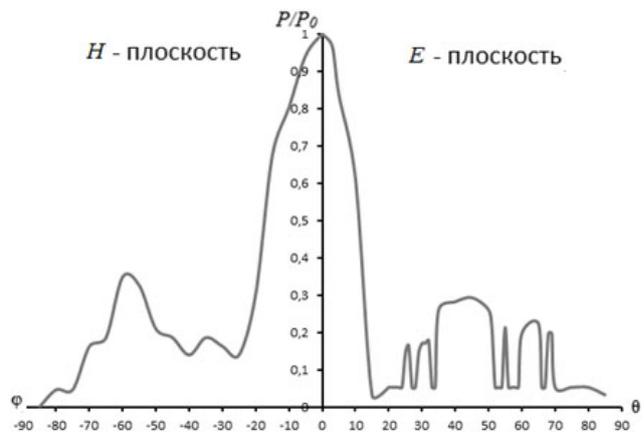


Рис. 6. Измеренная диаграмма направленности исследованных антенн для угла раскрыва $\alpha = 34^\circ$

На рис. 4–6 приведены нормированные по мощности диаграммы направленности исследованных антенн, полученные в ходе опытных измерений в плоскостях E и H для углов раскрыва 10° , 22° , 34° соответственно.

Из рис. 4 и 5 видно, что при углах раскрыва исследованных антенн $\alpha = 10^\circ$ и $\alpha = 22^\circ$, ширина главного луча ДН в плоскости H по половинной мощности практически не изменяется. Это подтверждается как нашими результатами моделирования, так и приведенными в [8] (рис. 3), а также опытными результатами, приведенными в [8]. Однако, при дальнейшем увеличении угла раскрыва антенн α (см. рис. 6, где $\alpha = 34^\circ$), ширина главного луча ДН в плоскости H сужается, что подтверждается также опытными результатами, полученными нами для антенн, исследованных в [2; 3]. Следовательно, имеет место ограничение применимости модельных представлений, разработанных нами [2; 3; 5–7] и в [8] по углу линейного расширения излучающей щели α . На рис. 7 приведены сравнительные графики зависимости ширины главного луча ДН

исследовавшихся антенн в плоскостях E и H по половинной мощности в зависимости от угла раскрыва α , полученные опытным путем нами (по совокупности результатов данной статьи и [2]), и авторами [8].

Из рис. 7 следует, что результаты, полученные нами и авторами [8] для плоскости H опытных ДН хорошо согласуются до углов раскрыва α порядка 25° . При этом ширина главного луча ДН по половинной мощности практически остается постоянной и составляет порядка 57° . Далее ширина главного луча ДН начинает уменьшаться, что не соответствует расчетным данным (рис. 3). По нашим представлениям полученные опытные результаты и определяют границы применимости использовавшихся моделей для плоскости H по углу раскрыва (предельное его значение порядка 25°).

Для плоскости E (рис. 7) ширина главного луча ДН исследовавшихся антенн, полученных опытным путем, хорошо согласуется с опытными результатами [8] и с результатами, полученными расчетным путем (рис. 3). При увеличении угла раскрыва антенны α больше 22° тенденции зависимостей сохраняются как для расчетных, так и для опытных ДН, что для плоскости E являлось прогнозируемым, как и в случае расчетных ДН.

Проведенные измерения ДН исследовавшихся антенн в плоскостях E и H на границах частотного диапазона (6–12) ГГц показали, что отклонение ширины ДН в указанных плоскостях по половинной мощности составляло единицы процентов.

Заключение

Расчитаны теоретически и измерены опытным путем диаграммы направленности плоских симметричных щелевых антенн с линейно расширяющимся раскрывом для значений углов раскрыва 10° , 22° , 30° , 34° , 60° , при постоянной длине раскрыва антенн $L = 150$ мм для всех исследовавшихся образцов. Анализ расчетных ДН показал, что при увеличении угла раскрыва антенн в указанных пределах, в плоскости H их ширина по половинной мощности не изменялась и имела значение порядка 59° . Из полученных опытных зависимостей ширины ДН исследовавшихся антенн от угла раскрыва, изменявшегося в тех же пределах, следует, что в плоскости H их ширина по уровню половинной мощности сохраняется неизменной (порядка 57°) только до

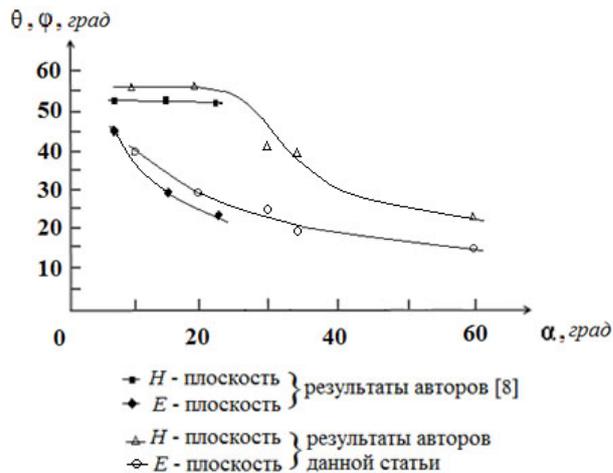


Рис. 7. Графики зависимостей ширины главного луча опытных ДН в плоскостях E и H по половинной мощности от угла раскрыва антенн, полученные авторами [8] и данной статьи

некоторого предельного угла раскрыва (в нашем случае он имел значение порядка 25°). Далее ширина главного луча ДН начинает уменьшаться, что не соответствует расчетным данным, из чего следует, что указанный предельный угол раскрыва исследовавшихся антенн определяет границу применимости использовавшихся модельных представлений.

В плоскости E ширина главного луча ДН исследовавшихся антенн, полученных опытным путем, хорошо согласуется с расчетными результатами; при увеличении угла раскрыва антенн, ширина их главного луча монотонно сужалась, что для плоскости E являлось прогнозируемым.

Полученные закономерности изменения ширины ДН в зависимости от угла раскрыва в плоскостях E и H подтверждается зарубежными исследованиями (как для расчетных, так и для опытных ДН), но при изменении углов раскрыва антенны в более узком диапазоне (до 22°).

Измерения ДН производились на частоте $f_0 = 10$ ГГц и на границах частотного диапазона (6–12) ГГц, при этом различия измеренных ДН были незначительными (в пределах нескольких процентов).

Список литературы

1. Нефёдов Е.И., Субботина Т.И., Яшин А.А. Взаимодействие физических полей с биологическими объектами: уч. пособ. / под ред. Е.И. Нефёдова и А.А. Хадарцева. М.: Курс; Инфра, 2016. 344 с.
2. Изучение влияния угла раскрыва плоских коротких щелевых антенн микроволнового диапазона на их электродинамические характеристики / В.П. Заярный [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 6. С. 529–534.

3. Изучение электродинамических характеристик плоских симметричных антенн микроволнового диапазона с линейно расширяющимся раскрытием / В.П. Заярный [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 4. С. 18–23.
4. Нефёдов Е.И., Пономарев И.Н. Возбуждение идеально проводящей полуплоскости расширяющейся щелью, прорезанной перпендикулярно ее краю // Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. 2014. Т. 18. № 1. С. 58–84.
5. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 328–335.
6. Заярный В.П., Парпула С.А., Гирич В.С. Изучение характеристик плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрытием для дисковых антенных решеток // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 11. С. 106–111.
7. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Антенна кругового обзора сверхвысококачественного диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 10–11. С. 697–703.
8. Janaswamy R., Shaubert D.H., Pozar D.M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // Radio Science. 1986. Vol. 21. № 5. P. 797–804.
9. Неганов В. А., Раевский С.В., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика. Т. 1 / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2000. 509 с.
10. Неганов В. А., Нефёдов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн: уч. пособ. для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
11. 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.

The features of radiation pattern characteristics of microwave planar slot antennas with linearly increasing aperture

V.P. Zayarnyi, E.I. Nefyodov, S.A. Parpula, I.N. Ponomarev

Radiation patterns of planar symmetric slot antennas of microwave range (the central frequency $f_0 = 10$ GHz) with linearly increasing aperture of constant length ($5\lambda_0 = 150$ mm) were get by means of theory and experiment in E and H planes for fixed values 10° , 22° , 30° , 34° and 60° of aperture angles. The limits of applicability of model concepts of investigated antennas were established on the base of experiment data. They were almost invariable at the boundaries of range 6–12 GHz.

Keywords: planar symmetric slot antenna, linearly tapered aperture, microwave range, radiation pattern, half power beam width.
