

## Об особенностях диаграммы направленности симметричных щелевых антенн в микроволновом диапазоне

В.П. Заярный<sup>1</sup>, Е.И. Нефедов<sup>2</sup>, С.А. Парпула<sup>1</sup>, И.Н. Пономарев<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> Волгоградский государственный университет  
400062, Российская Федерация, г. Волгоград  
Университетский пр., 100

Изучались особенности диаграмм направленности антенн на основе плоских симметричных щелевых линий постоянной ширины на частоте 10 ГГц в плоскостях Е и Н при изменении их длины и ширины. Сравнительный анализ результатов математического моделирования и результатов эксперимента показал, что при увеличении ширины щели в пределах  $0,5\lambda_0 - 1,5\lambda_0$  (1,5–4,5 см), ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности в плоскости Е сужалась, что является ожидаемым, в то время, как в плоскости Н она оставалась практически неизменной.

*Ключевые слова:* плоская симметричная щелевая линия, СВЧ-диапазон, диаграмма направленности, ширина луча по половинной мощности, антенна с щелью постоянной ширины.

### Введение

Антенны для радиотехнических систем, выполненные с применением щелевых линий различных конфигураций, представляют практический интерес, в частности для систем сверхбыстрой передачи и обработки информации на объемных интегральных схемах, работающих в микроволновом и оптическом диапазоне [1; 2], что является актуальным. При исследовании свойств подобных антенн и их диаграмм направленности (ДН) принципиально важно, чтобы выявленные их особенности в процессе измерений подтверждались адекватными электродинамическими моделями. Для этого требуется разработка соответствующих математических моделей, согласованных с опытными результатами [3–6], что обеспечивает достоверность полученных результатов и выводов.

В данной работе исследовалась щелевая антенна, которая представляет собой щель регулярной ширины  $W$  и длиной  $L$ , прорезанную в тонком слое металлизации и соединенную с узкой питающей симметричной щелевой линией (ЩЛ) передачи с помощью плавного согласующего перехода. Диэлектрическая подложка

ЩЛ имеет проницаемость  $\varepsilon$  и толщину  $d$ . Для анализа такой антенны использовалась электродинамическая модель, в которой практическая конструкция антенны конечных размеров заменяется идеально проводящей бесконечной полуплоскостью, возбуждаемой регулярной щелью, прорезанной в полуплоскости перпендикулярно ее краю (рис. 1). В такой антенне первоначально устанавливается стороннее возбуждающее поле  $E_z^{cm}(r', z')$  в апертуре излучающей щели  $S'$ , а затем используется уже решенная задача возбуждения идеальной полуплоскости этим полем [3–11]. Такой подход является приближенным к реально действующим антеннам, однако является весьма эффективным и широко распространенным. В нем анализ поля излучения антенны на основе симметричной ЩЛ сводится к строгому аналитическому решению известной эталонной задачи математической теории дифракции. По результатам этой модели можно производить проверку и тестирование решений, полученных другими способами, например, с помощью метода интегральных уравнений.

Такой подход дает хорошие результаты моделирования для анализа и изучения физических

процессов излучения антенны бегущей волны на различных ЦЛ. Присутствие тонкой диэлектрической подложки вносит некоторую погрешность, являющуюся пренебрежимо малой и не оказывающей существенного влияния на распределение электрического поля в поперечном направлении щели. В продольном направлении щели диэлектрическая подложка приводит к образованию поверхностных волн, у которых замедление фазовой скорости зависит от ширины щели  $W$ , толщины самой подложки  $d$  и ее диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Однако наличие тонкой подложки также упрощает ситуацию, при этом погрешность является пренебрежимо малой.

### 1. Математические модели диаграмм направленности исследуемых антенн и их анализ

Разработка математических моделей ДН щелевых антенн в общем виде была произведена в [8], а их адаптация к исследуемым антеннам – в [3–7; 9–11]. В данном случае для анализа ДН в плоскостях  $E$  и  $H$  использовалась модель вида [7], в которой электрическое поле в дальней зоне от регулярной щели, прорезанной в идеальной полуплоскости перпендикулярно ее краю, в направлении максимального излучения в сферической системе координат имеет только одну компоненту  $E_\theta(R, \varphi, \theta)$  и определяется выражением

$$E_\theta(R, \varphi, \theta) = \frac{ik}{\pi\sqrt{2}} \frac{e^{-ikR}}{R} \times \iint_{S'} E_z^{cm}(r', z') G_\theta(r', z', \varphi, \theta) dS' \quad (1)$$

Здесь функция  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  связывает стороннее поле возбуждения  $E_z^{cm}(r', z')$  в точке источников поля (или точки интегрирования)  $q(r', z')$  с полем излучения в точке наблюдения  $p(r, \varphi, z) = p(R, \varphi, \theta)$  (см. рис. 1) и является элементом тензорной (или диадной) функции Грина для идеально проводящей полуплоскости, возбуждаемой двусторонней щелью, прорезанной перпендикулярно краю полуплоскости. В нашем случае интегрирование производилось по поверхности регулярной щели  $S' = LW$ , а плавный согласующий переход  $L_f$  и питающая ЦЛ в (1) никак не учитывались (см. рис. 1). Элементарная площадка в (1) определялась как  $dS' = dr'dz'$ . Элемент тензорной функции Грина  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  имеет вид

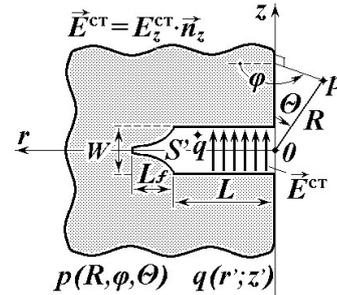


Рис. 1. Щелевой излучатель со щелью постоянной ширины  $W$

$$G_\theta = \left[ \begin{aligned} &= \left| \sin \varphi \right| e^{i \left( \frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta \cos \varphi + kz' \cos \theta \right)} Fr(a) + \\ &+ \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right) e^{-i \left( \frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta - kz' \cos \theta \right)} \frac{1}{\sqrt{\pi kr' \sin \theta}} \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где

$$Fr(a) = \int_0^a \frac{e^{-it}}{\sqrt{2\pi t}} dt$$

– комплексный интеграл Френеля;

$$a = (1 + \cos \varphi) kr' \sin \theta$$

– аргумент комплексного интеграла Френеля.

Из (2) следует, что элемент диадной функции Грина  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  состоит из двух слагаемых, которые разным образом действуют на  $q(r', z')$  и формируют поле излучения антенны. Важно отметить, что в формировании основной компоненты поля  $E_\theta(R, \varphi, \theta)$  в плоскости  $H$  при  $\theta = \pi/2$  и  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  в элементе  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  участвуют два слагаемых, а в плоскости  $E$  при  $\varphi = \pi$  и  $0 < \theta < \pi$  – только второе слагаемое, что является характерным свойством излучения идеальной полуплоскости, возбуждаемой щелью, прорезанной перпендикулярно ее краю [3–11].

Аналогично [3–6; 9], в качестве возбуждающего поля в регулярной щели в (1) использовалось квазистатическое приближение: статическое решение вдоль оси  $z$  для электрического поля в поперечном сечении щели  $W$  с учетом особенностей для поля на краях этой щели, а также характер бегущей волны предполагаемого поля возбуждения вдоль оси  $r$  (см. рис. 1).

Полученные расчетные ДН в плоскостях  $E$  и  $H$  для исследовавшихся ЦЛ были выполнены по мощности, нормированы и приведены на

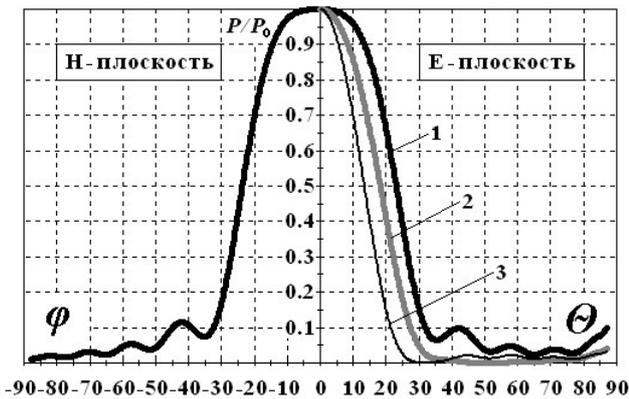


Рис. 2. Расчетные ДН исследуемых ЩЛ при постоянной длине  $L = 5\lambda_0$  для значений ширины щели  $0,5\lambda_0$ ,  $1,0\lambda_0$  и  $1,5\lambda_0$  (соответственно, графики 1, 2, 3)

рис. 2. Поскольку в модельных представлениях выполняется условие симметрии ДН, то взяты их половинные изображения в плоскостях  $E$  и  $H$ . Расчет производился для случаев, когда длина щели составила  $L = 5\lambda_0$  (в нашем случае длина волны СВЧ колебаний  $\lambda_0 = 3$  см), а ширина щели  $W$  принимала фиксированные значения  $0,5\lambda_0$ ,  $1,0\lambda_0$  и  $1,5\lambda_0$ .

Анализ полученных расчетных ДН показал, что в плоскости  $E$  имеют место закономерности, установленные ранее в подобных щелевых структурах [3–5; 8], а именно: при увеличении ширины щели  $W$  главный луч ДН сужается. Однако в плоскости  $H$ , при изменении ширины щели в тех же пределах, ширина главного луча и боковые лепестки практически не изменялись. В работе [8] авторами была выявлена аналогичная ситуация при исследовании щелевых антенн с линейно расширяющимся раскрывом. Если учесть, что в указанной работе для проведения анализа свойств излучения линейно расширяющейся щели использовался метод регуляризации раскрыва (т. е. представление такой щели в виде последовательности регулярных участков постоянной ширины, скачкообразно изменяющих ширину щели в виде ступенек через определенные интервалы ее длины, подобно [4]), то можно предположить, что у нас и у авторов [8] для ДН в плоскости  $H$  имеет место одна и та же физическая закономерность.

В процессе моделирования, при изменении длины  $L$  исследовавшихся ЩЛ в пределах  $(2-9)\lambda_0$ , для постоянных значений ширины щели  $W$  (брались указанные выше фиксированные значения), нами были получены уже известные результаты, аналогичные [8] (при увеличении длины ЩЛ  $L$ ,

ширина ее основного луча в плоскостях  $E$  и  $H$  и уровень боковых лепестков уменьшались).

## 2. Опытное измерение диаграмм направленности исследуемых антенн и их анализ

Опытные измерения образцов щелевых антенн, аналогичных тем, для которых приведены математические модели, в виде симметричных ЩЛ постоянной ширины  $W$ , производились на физической установке, описанной в [3; 9] и модернизированной для проведения настоящих исследований. При изготовлении исследуемых образцов антенн учитывались их электродинамические свойства, конечные размеры по ширине реальной конструкции антенны и особенности, описанные в [12; 13]. Антенны были изготовлены на подложке из пенопласта, диэлектрическая проницаемость которого практически совпадает с воздухом и равна  $\epsilon = 1$ . Геометрические размеры  $L$  и  $W$  для излучающих щелей выбирались такими же, как и в случае изучения их математических моделей. Измерения ДН были также выполнены на частоте излучения  $f_0 = 10$  ГГц ( $\lambda_0 = 3$  см).

Измеренные и нормированные ДН по мощности исследовавшихся антенн для фиксированной длины  $L = 5\lambda_0$  в  $H$  и  $E$  плоскостях приведены полностью на рис. 3–5.

Из полученных зависимостей ДН излучения видно, что в плоскости  $H$  ширина ДН по уровню половинной мощности, аналогично расчетным зависимостям ДН, практически не зависит от ширины щели  $W$  при ее изменении в указанных пределах. Таким образом, эксперимент подтверждает постоянную ширину главного луча ДН в плоскости  $H$  для симметричных щелевых антенн регулярной ширины на частоте  $f_0 = 10$  ГГц для фиксированных различных значений  $W$ . В плоскости  $E$  измеренная ширина ДН основного луча по уровню половинной мощности демонстрирует достаточно хорошее совпадение с результатами теоретического расчета. Здесь ширина ДН является обратно пропорциональной ширине регулярной щели излучения, т. е. уменьшается при увеличении  $W$ . Полученные совпадения достигнутых результатов расчета и измерений приведены в таблице. При проведении измерений в диапазоне частот 8–12 ГГц рассмотренные закономерности в  $H$  и  $E$  плоскостях оставались неизменными.

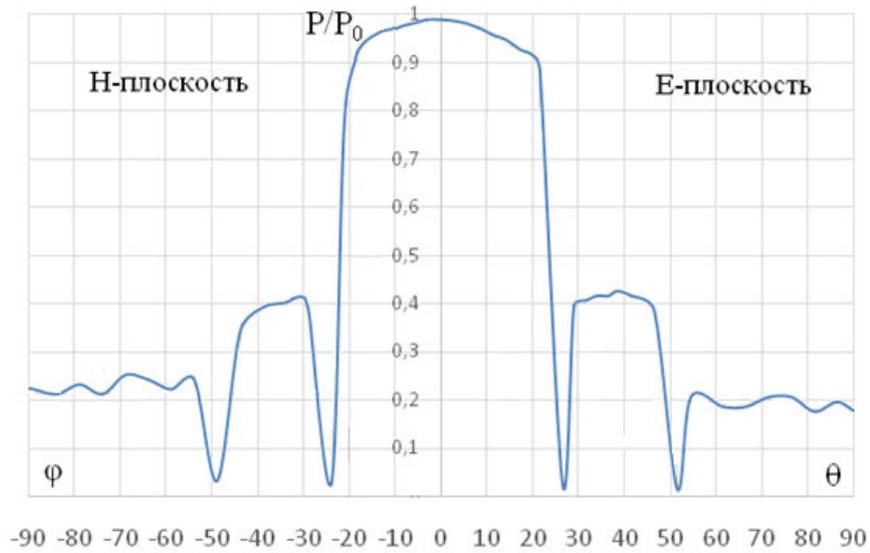


Рис. 3. Измеренные ДН щелевой антенны для значения  $W = 0,5\lambda_0$

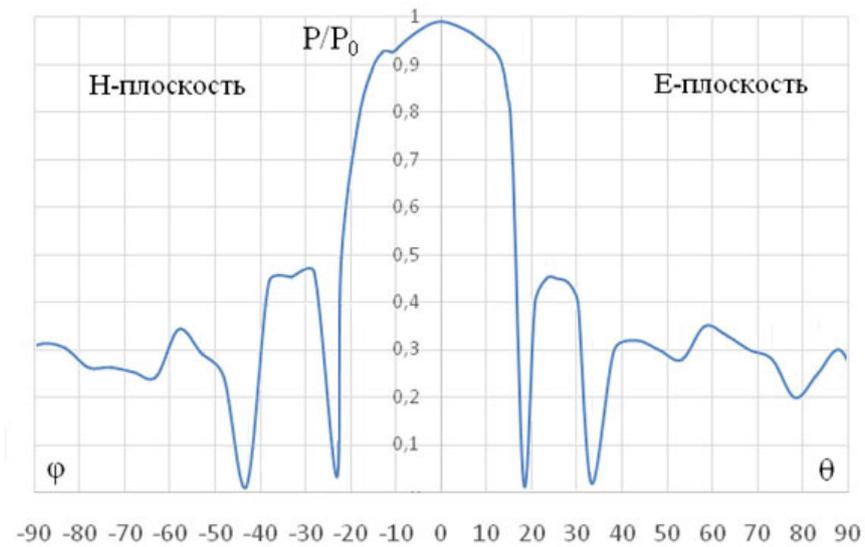


Рис. 4. Измеренные ДН щелевой антенны для значения  $W = 1,0\lambda_0$

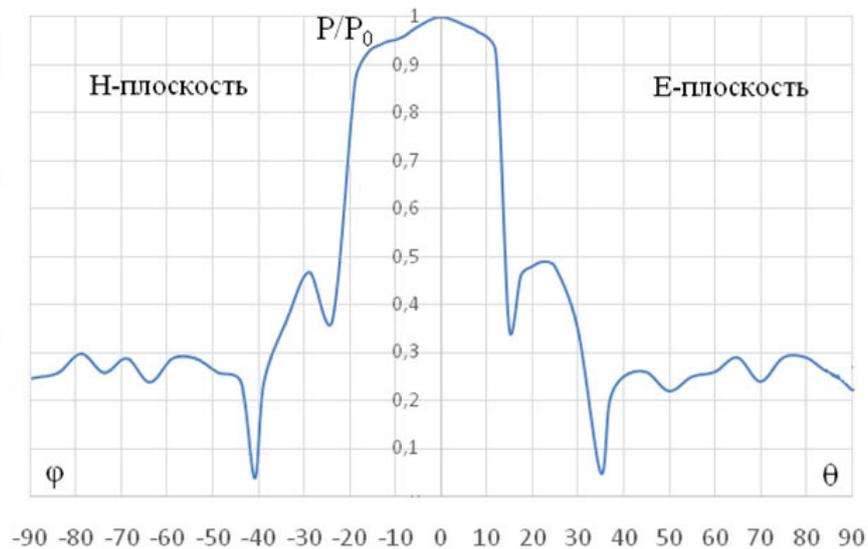


Рис. 5. Измеренные ДН щелевой антенны для значения  $W = 1,5\lambda_0$

## Таблица

Сравнение измеренных и расчетных значений

Ширина главного луча по половинной мощности, градусы				
Главные плоскости излучения	плоскость $H$	плоскость $E$		
		$L = 5\lambda$ $W = 0,5\lambda$	$L = 5\lambda$ $W = 1,0\lambda$	$L = 5\lambda$ $W = 1,5\lambda$
Измерения в ходе опыта	44	47	33	27
Теоретический расчет	47	46	36	27

Согласно полученным результатам, уровень боковых лепестков в  $H$  и  $E$  плоскостях у расчетных ДН оказался в 4–5 раз меньше, чем для измеренных в опытных исследованиях, что можно объяснить конечностью размеров у реальной конструкции антенны по сравнению с моделью бесконечной полуплоскости. Вероятно, другой причиной является значительный уровень отражений электромагнитных волн в лаборатории, в которой проводились измерения. При этом, положительным образом следует отметить хорошее практическое совпадение первого бокового лепестка в  $H$  плоскости для всех трех измеряемых образцов антенны с разной шириной регулярной щели  $W$  (см. рис. 3–5). Это совпадение еще раз доказывает, что в плоскости  $H$  ширина щели  $W$  практически никак не влияет на ДН исследуемой антенны. Отметим, что в плоскости  $E$  первый боковой лепесток имеет различное месторасположение по углам  $\theta$  в ДН для всех трех образцов антенны, что подтверждает зависимость ДН излучения исследуемых щелевых антенн от  $W$  в этой плоскости.

### Заключение

Проведены теоретические и опытные исследования излучательных свойств симметричных щелевых линий постоянной ширины в микроволновом диапазоне частот. При разработке математических моделей диаграмм направленности подобных щелей исходили из предположения, что практическая конструкция антенны конечных размеров заменяется идеально проводящей бесконечной полуплоскостью, возбуждаемой регулярной щелью, прорезанной в полуплоскости перпендикулярно ее краю. Расчет ДН производился для случаев, когда длина щели составила  $L = 5\lambda_0$  (в нашем случае для рабочей частоты  $f_0 = 10$  ГГц длина волны  $\lambda_0 = 3$  см), а ширина

щели принимала фиксированные значения  $0,5\lambda_0$ ,  $1,0\lambda_0$  и  $1,5\lambda_0$ .

Анализ полученных расчетных ДН показал, что в плоскости  $E$  имеют место закономерности, установленные ранее в подобных щелевых структурах, однако в плоскости  $H$ , при изменении ширины щели в тех же пределах, ширина главного луча и боковые лепестки практически не изменялись. В процессе моделирования, при изменении длины щели в пределах  $(2-9)\lambda_0$ , для постоянных значений ширины щели (брались указанные выше фиксированные значения), были получены ожидаемые результаты, т. е. при увеличении длины щели, ширина ее основного луча в плоскостях  $E$  и  $H$  и уровень боковых лепестков уменьшались.

Из полученных опытных зависимостей ДН следует, что в плоскости  $H$  ширина ДН по уровню половинной мощности, аналогично расчетным ДН, практически не зависит от ширины щели при ее изменении в тех же пределах, что и в случае расчетных ДН. Таким образом, эксперимент подтверждает постоянство ширины главного луча ДН в плоскости  $H$  для симметричных щелевых антенн постоянной ширины для их значений в пределах  $(0,5-1,5)\lambda_0$ . В плоскости  $E$  свойства и закономерности измеренных ДН для основного луча с хорошей точностью согласованы с результатами теоретического расчета. При проведении подобных измерений для исследованных антенн в диапазоне частот (8–12) ГГц рассмотренные закономерности их ДН в плоскостях  $H$  и  $E$  сохранялись.

### Список литературы

1. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas: Lecture Course for Students and Engineers. N.-Y.: Scientific Research Publishing, 2012. 449 p.

2. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой, Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайневисоких частот. М.: Наука; Физматлит, 1996. 304 с.
3. 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.
4. 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.
5. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Антенна кругового обзора сверхвысокочастотного диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 10–11. С. 697–703.
6. Изучение влияния угла раскрытия 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.
7. Нефедов 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.
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. 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.
10. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 5. С. 139–151.
11. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // В сборнике: Радиолокация, навигация, связь. XX Междунар. науч.-техн. конф. 2014. С. 687–697.
12. 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.
13. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн: уч. пос. для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.

---

## About the features of radiation pattern of the symmetric slot antennas in microwave range

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

Features of radiation patterns of antennas on the basis of planar symmetric slot lines of constant width at a frequency of 10 GHz, in the E and H planes in case of change of their length and width were studied. The comparative analysis of mathematical modeling results and results of an experiment has shown that at increase of a regular slot width within 0,5 to 1,5 or 1,5 sm to 4,5 sm, the level of half power beam width of the main lobe in the E plane was narrowed, while it remained almost invariable in the H plane.

*Keywords:* planar symmetric slot line, microwave range, radiation pattern, half power beam width, constant width slot antenna.

---