

## Разработка строгих математических моделей для плоских щелевых антенн бегущей волны с использованием тензорной функции Грина и их экспериментальное обоснование

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

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

<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет  
400005, Россия, г. Волгоград,  
пр. им. В.И. Ленина, 28

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

*Аннотация* – Произведена разработка строгих математических моделей для антенн бегущей волны с постоянной шириной щели на основе тензорной функции Грина с учетом как основной, так и кросс-поляризованной составляющей поля в дальней зоне излучения. Обоснована возможность использования этих моделей в качестве базовых моделей для исследования электродинамических свойств антенн бегущей волны с другой конфигурацией щели (линейно-, экспоненциально расширяющиеся и др.). С применением полученных математических моделей изучалось влияние геометрических параметров исследовавшихся антенн бегущей волны на их характеристики. Установлено, что для электродинамической плоскости  $E$  при увеличении длины и ширины щели главный луч диаграммы направленности сужается, что приводит к повышению направленных свойств антенн. В электродинамической плоскости  $H$  ширина главного луча диаграммы направленности уменьшается только при возрастании длины щели антенн бегущей волны и практически не зависит от ее ширины. Показано, что полученные теоретические результаты исследования хорошо согласуются с результатами экспериментов, которые также позволили выявить ограничения применимости разработанных моделей. Исследование характеристик антенн бегущей волны производилось на средней частоте 10 ГГц в диапазоне частот 8–12 ГГц.

*Ключевые слова* – антенна бегущей волны, симметричная щелевая линия, щель постоянной ширины, идеальная полуплоскость, диаграмма направленности, микроволновый диапазон.

### Введение

В современной радиоэлектронной аппаратуре, в частности в составе систем сверхбыстрой обработки информации с применением объемных интегральных схем (ОИС), являются востребованными плоские щелевые антенны (ЩА) различных конфигураций [1; 2]. Известны различные виды подобных ЩА, работающих в режиме продольного осевого излучения и поэтому принадлежащих к классу антенн бегущей волны (АБВ). К ним относятся антенны с постоянной шириной щели, с линейно расширяющейся щелью, с экспоненциально расширяющейся щелью (антенна Вивальди) и щели со специальным расширением в виде плавного согласующего перехода на входе АБВ со свободным пространством на ее выходе. Конструкция таких антенн обеспечивает высокий коэффициент усиления, низкий уровень боковых лепестков и достаточно широкую полосу частот [3; 4]. Подобные антенны особенно востребованы при разработке ОИС микроволнового и оптического диапазонов, поэтому дальнейшее изучение

их электродинамических свойств представляется важным и актуальным.

В данной статье внимание уделено приоритетному исследованию электродинамических свойств щелевых антенн с постоянной шириной щели (ПЩА) по следующим причинам. Во-первых, именно для этих АБВ оказалась возможной разработка строгих математических моделей для расчета поля на основе тензорной функции Грина, учитывающих как основную, так и кросс-поляризованную составляющую поля излучения. Во-вторых, модели для ПЩА применимы для разработки математических моделей АБВ, имеющих другую конфигурацию щели, для которых возможно их представление в виде набора регулярных участков постоянной ширины, скачкообразно изменяющих ширину через определенные интервалы их длины в соответствии с законом изменения щели данной АБВ [5–7]. В-третьих, ПЩА относительно просты и технологичны в изготовлении, что способствует качественному производству требуемого количества образцов АБВ различной

конфигурации для проведения экспериментальных исследований.

### 1. Математическая модель поля излучения щелевой антенны с постоянной шириной щели на основе тензорной функции Грина

Одна из первых электродинамических моделей для расчета поля излучения ПЩА была предложена в [8; 9]. Однако она не учитывает кроссполаризационную составляющую поля излучения, и, как следствие, в ней отсутствует соответствующая компонента тензорной функции Грина. В данной статье разработана строгая математическая модель поля излучения ПЩА, учитывающая обе компоненты функции Грина, что позволяет определить полное электромагнитное поле в дальней зоне излучения. При этом в ней физическая конструкция ПЩА заменялась идеально проводящей бесконечной полуплоскостью, возбуждаемой внешним сторонним электрическим полем в щели постоянной ширины, врезанной перпендикулярно краю полуплоскости (рис. 1). В такой модели первоначально устанавливается поле в апертуре регулярной щели, а затем решается задача возбуждения идеальной полуплоскости этим полем.

В общем случае обе компоненты электрического поля излучения для таких щелевых АБВ были получены в [10] и в сферической системе координат (рис. 1) имеют вид:

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

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

где  $E_z^{ext}(r', z')$  – внешнее стороннее электрическое поле возбуждения в апертуре регулярной щели  $S'$ ;  $z'$  и  $r'$  – соответственно, поперечная и продольная координаты источников стороннего поля  $q(r', z')$  в пределах щели;  $G_{\theta}(r', z', \varphi, \theta)$  и  $G_{\varphi}(r', z', \varphi, \theta)$  – элементы тензорной (диадной) функции Грина;  $k$  – коэффициент фазы (волновое число). При этом  $E_{\theta}(R, \varphi, \theta)$  является основной составляющей поля излучения, а  $E_{\varphi}(R, \varphi, \theta)$  – составляющей кроссполаризации.

Функции  $G_{\theta}(r', z', \varphi, \theta)$  и  $G_{\varphi}(r', z', \varphi, \theta)$  связывают поле в точке источника  $q(r', z')$  с полем излучения в точке наблюдения  $p(R, \varphi, \theta)$  (рис. 1) и определяются следующими соотношениями:

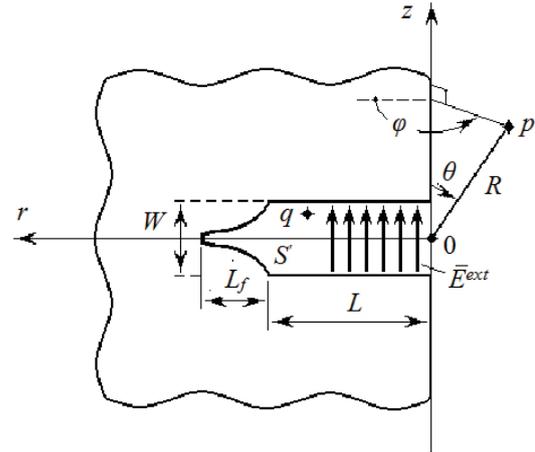


Рис. 1. Идеальная полуплоскость с постоянной по ширине щелью и сторонним полем  $\bar{E}^{ext} = E_z^{ext}(r'; z')\bar{n}_z$   
 Fig. 1. An ideal half-plane with constant width slot and its external electric field  $\bar{E}^{ext} = E_z^{ext}(r'; z')\bar{n}_z$

$$G_{\theta}(r', z', \varphi, \theta) = \left[ \sin \varphi \left| e^{i\left(\frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta \cos \varphi + kz' \cos \theta\right)} Fr(a) + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \frac{e^{-i\left(\frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta - kz' \cos \theta\right)}}{\sqrt{\pi kr' \sin \theta}} \right], \quad (3)$$

$$G_{\varphi}(r', z', \varphi, \theta) = \left[ \pm \cos \varphi e^{i\left(\frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta \cos \varphi + kz' \cos \theta\right)} Fr(a) + \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \frac{e^{-i\left(\frac{\pi}{4} + kr' \sin \theta - kz' \cos \theta\right)}}{\sqrt{\pi kr' \sin \theta}} \right], \quad (4)$$

где

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

– комплексный интеграл Френеля;  $a = (1 + \cos \varphi) \times kr' \sin \theta$  – аргумент комплексного интеграла Френеля. В элементе  $G_{\varphi}(r', z', \varphi, \theta)$  в первом слагаемом знак «+» берется для случая  $0 \leq \varphi \leq \pi$ , а знак «-» – для случая  $\pi \leq \varphi \leq 2\pi$ . Интегрирование в (1), (2) производилось по поверхности регулярной щели  $S' = LW$  (рис. 1), при этом согласующий переход  $L_f$  и питающая щелевая линия не учитывались.

Из выражений (3), (4) следует, что элементы тензорной функции Грина  $G_{\theta}(r', z', \varphi, \theta)$  и  $G_{\varphi}(r', z', \varphi, \theta)$  состоят из двух слагаемых, которые разным об-

разом определяют действие внешних сторонних источников поля в точке  $q(r', z')$  и формируют поле излучения в (1), (2). Первые слагаемые в  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  и  $G_\varphi(r', z', \varphi, \theta)$  при  $r' = 0$  обращаются в нуль. Поэтому они определяют поле излучения от внешних источников  $q(r', z')$ , расположенных практически во всех точках щели  $S'$ , исключая краевые (при  $r' = 0$ ) и некоторую область возле края щели шириной  $r_{\min}$ , в пределах которой для  $a = (1 + \cos\varphi)kr' \sin\theta \approx 0$  в интервале  $0 \leq r' \leq r_{\min}$  значением интеграла Френеля можно пренебречь и считать  $Fr(a) \approx 0$ . Следовательно, для короткой щели длиной  $0 < L \leq r_{\min}$  и для всех точек наблюдения поля  $p(R, \varphi, \theta)$ , расположенных на краю идеальной полуплоскости при  $\theta = 0$  и  $\theta = \pi$ , а также в  $E$ -плоскости при  $\varphi = \pi$  и  $0 < \theta < \pi$ , это слагаемое обращается в нуль и на поле излучения не влияет. Вторые слагаемые в  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  и  $G_\varphi(r', z', \varphi, \theta)$ , наоборот, при  $r' = 0$  достигают бесконечного значения и вносят наибольший вклад в поле излучения для источников  $q(r', z')$ , расположенных на краю излучающей щели  $S'$ . По мере удаления источников  $q(r', z')$  от края щели вдоль оси  $r'$  вклад этого слагаемого в поле дальней зоны монотонно уменьшается по закону  $(kr')^{-1/2}$ . Второе слагаемое обеспечивает выполнение закона сохранения энергии для точек наблюдения  $p(R, \varphi, \theta)$ , приближающихся к краю полуплоскости при  $\theta = 0$  и  $\theta = \pi$ .

Таким образом, из выражений (3), (4) следует, что в формировании основной компоненты поля излучения  $E_\theta(R, \varphi, \theta)$  в плоскости  $H$  при  $\theta = \pi/2$  и  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  в элементе  $G_\theta(r', z', \varphi, \theta)$  участвуют оба слагаемых, а в плоскости  $E$  при  $\varphi = \pi$  и  $0 < \theta < \pi$  – только второе слагаемое. При этом как в плоскости  $H$ , так и в плоскости  $E$  элемент  $G_\varphi(r', z', \varphi, \theta)$  обращается в нуль. Такое поведение основной и кросс-поляризационной составляющих является характерным свойством излучения для идеальной полуплоскости, возбуждаемой щелью с любым законом расширения.

В качестве внешнего стороннего поля возбуждения для постоянной щели  $E_z^{ext}(r', z')$  в (1), (2) использовалось квазистатическое приближение. Согласно [6; 7], это внешнее поле определяется выражением

$$E_z^{ext}(r', z') = \frac{W}{\pi} \frac{e^{+ikr'}}{\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 - z'^2}}. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой статическое решение по координате  $z'$  для электрического поля в поперечном сечении щели с учетом особен-

ностей поведения поля на краях этой щели. При этом внешнее поле (5) имеет характер бегущей волны, распространяющейся вдоль щели по координате  $r'$  к краю полуплоскости.

Приведенные модельные представления для ПЩА уже частично апробировались и проверялись в соответствующих разработках [5; 6; 10–12].

## 2. Расчет диаграмм направленности исследованных щелевых антенн с применением полученных строгих математических моделей

Полученные в разделе 2 соотношения явились основой для расчета диаграмм направленности исследуемых ПЩА. Расчет обеих компонент поля излучения в дальней зоне в электродинамических плоскостях  $E$  и  $H$  для них производился с использованием выражений (1)–(5) в микроволновом диапазоне, на средней частоте излучения 10 ГГц (соответствующая длина волны  $\lambda_0 = 3$  см).

На рис. 2–4 приведены семейства расчетных ДН для ПЩА, у которых длина  $L$  принимала значения 3 см, 9 см и 15 см. Для каждого из этих значений длины щели, ее ширина  $W$  имела значения 3 см, 6 см и 9 см. На всех рисунках диаграммы направленности нормированы по мощности и показаны половины их изображений в плоскостях  $E$  (справа) и  $H$  (слева), исходя из условия их симметрии.

Из приведенных графиков ДН видно, что с увеличением длины щели  $L$  и ее ширины  $W$  ширина ДН уменьшается, что свидетельствует об увеличении коэффициента направленного действия. При этом уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН снижается, что говорит о повышении усилительных свойства антенны.

Для теоретических (расчетных) ДН бесконечная полуплоскость считается идеально ровной, а щель регулярная и абсолютно симметричная, поэтому влияние кросс-поляризационной составляющей поля в главных электродинамических плоскостях  $E$  и  $H$  отсутствует (показано в разделе 1). Расчет кросс-поляризационной составляющей поля для произвольных значений углов  $\theta$ ,  $\varphi$  в пределах  $0 < \theta$ ,  $\varphi < \pi/2$  показал, что она хаотически изменялась относительно среднего уровня порядка –15 дБ, а ее максимальные значения не превышали –8 дБ (в системе координат рис. 2–4 соответственно, уровни 0,032 и 0,158), что для данных ПЩА ниже уровня половинной мощности. Установление более точных характеристик распределения кросс-поляризационной составляющей для ПЩА, подобных

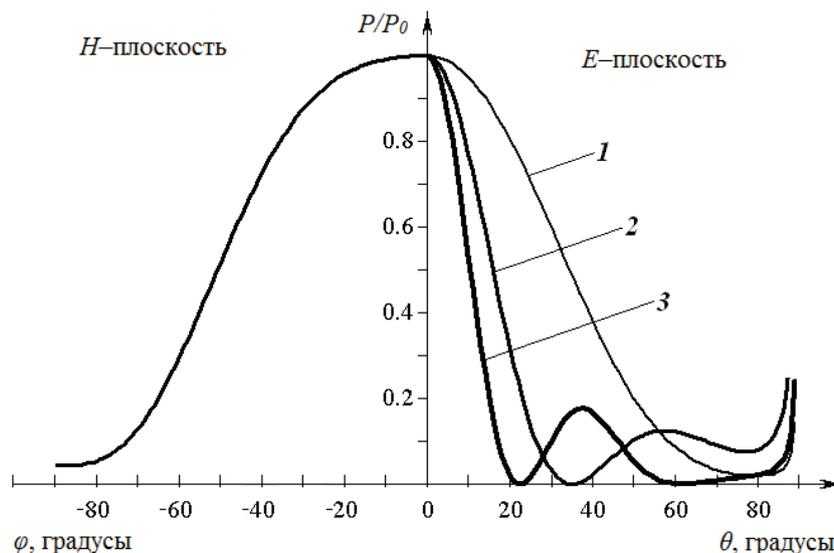


Рис. 2. Расчетные ДН исследованных ПЩА при постоянной длине  $L = 3$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1),  $W = 6$  см (кривая 2),  $W = 9$  см (кривая 3)  
Fig. 2. Calculated RP of investigated CWSA on constant length  $L = 3$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1),  $W = 6$  cm (graph 2),  $W = 9$  cm (graph 3)

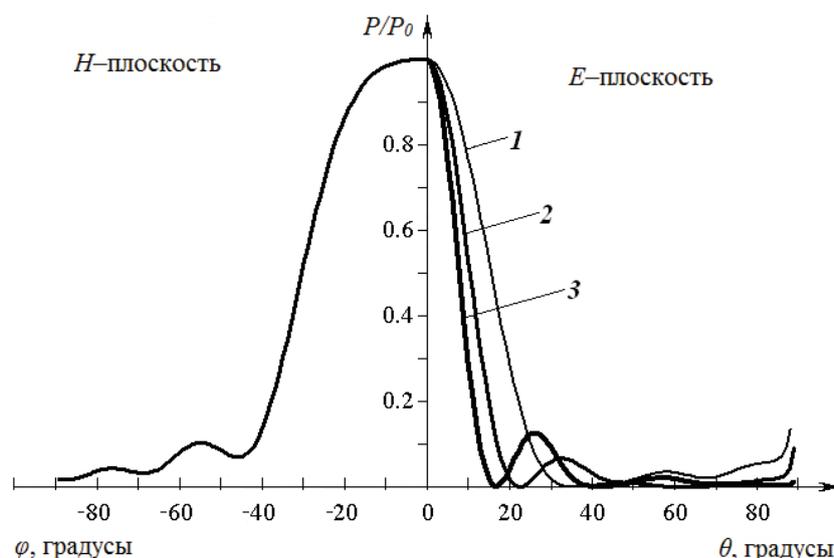


Рис. 3. Расчетные ДН исследованных ПЩА при постоянной длине  $L = 9$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1),  $W = 6$  см (кривая 2),  $W = 9$  см (кривая 3)  
Fig. 3. Calculated RP of investigated CWSA on constant length  $L = 9$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1),  $W = 6$  cm (graph 2),  $W = 9$  cm (graph 3)

исследованным, является задачей достаточно трудоемкой и требует отдельного изучения.

### 3. Экспериментальное измерение диаграмм направленности исследованных плоских щелевых антенн и их анализ

Для проведения натурального эксперимента был изготовлен ряд опытных образцов плоских симметричных щелевых антенн с постоянной шириной щели, аналогичных показанным на рис. 1. При этом для них длина  $L$  и ширина  $W$  щели имели те

же значения, что и в случае расчетных ДН. Для изготовления опытных ПЩА использовалась металлическая поверхность, имеющая высокую проводимость (медь, алюминий), нанесенная на тонкую диэлектрическую подложку, диэлектрическая проницаемость которой  $\epsilon \approx 1$ . Поэтому ее наличие практически не оказывает влияния на фазовую скорость волны и позволяет разработку точных математических моделей для данных ПЩА.

Измерение ДН опытных ПЩА производилось также на частоте  $f_0 = 10$  ГГц ( $\lambda_0 = 3$  см) на физической установке, описанной в [13; 14], модернизи-

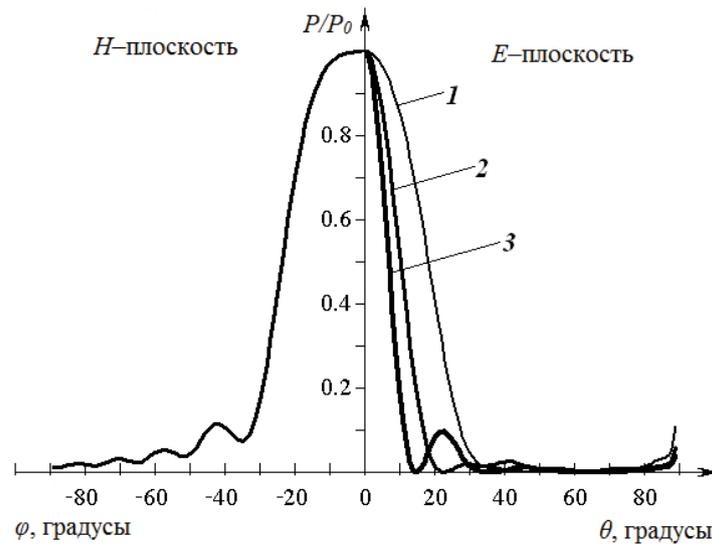


Рис. 4. Расчетные ДН исследовавшихся ПЩА при постоянной длине  $L = 15$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1),  $W = 6$  см (кривая 2),  $W = 9$  см (кривая 3)  
Fig. 4. Calculated RP of investigated CWSA on constant length  $L = 15$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1),  $W = 6$  cm (graph 2),  $W = 9$  cm (graph 3)

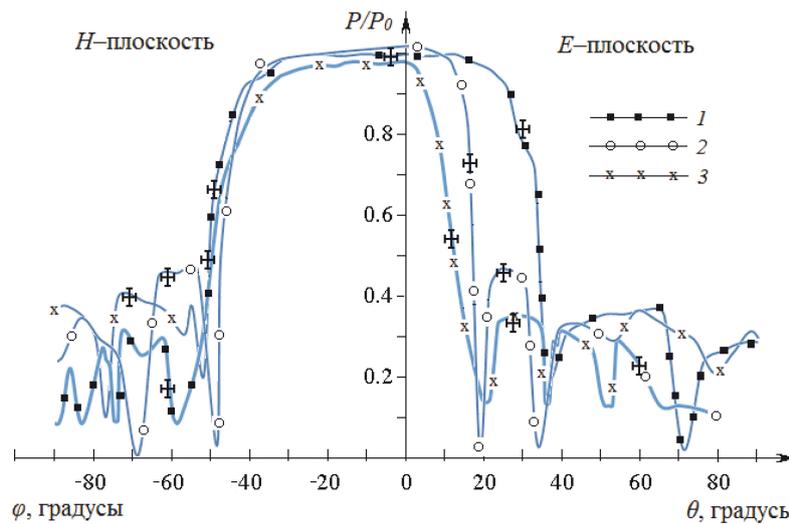


Рис. 5. Экспериментально измеренные ДН щелевых антенн при постоянной длине  $L = 3$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1);  $W = 6$  см (кривая 2) и  $W = 9$  см (кривая 3)  
Fig. 5. Experimentally measured RP of slot antennas on constant length  $L = 3$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1);  $W = 6$  cm (graph 2) and  $W = 9$  cm (graph 3)

рованной для проведения данных исследований. Питание ПЩА производилось аналогично питанию щелевых линий, описанному в [5].

Измеренные диаграммы направленности для исследовавшихся ПЩА приведены на рис. 5–7. Они также нормированы по мощности и совмещены для удобства сравнения.

Из анализа приведенных на рис. 5–7 результатов следует, что для E-плоскости экспериментально измеренные ДН по уровню половинной мощности очень хорошо согласуются с теорией для значений  $L = 9$  см и  $15$  см (когда  $L/\lambda_0 > 1$ ). Для более коротких антенн при приближении значений  $L/\lambda_0$  к 1 рассогласование между измеренными и расчетными

ДН нарастает и принимает значения, превышающие значение статистической погрешности (по углу ее значение порядка  $4^\circ$ ). Экспериментально установлено, что при дальнейшем уменьшении длины ПЩА форма их ДН искажалась, рассогласование с расчетными ДН существенно увеличивалось. Таким образом, для исследовавшихся ПЩА условие  $L/\lambda_0 > 1$  определяет границу применимости разработанных модельных представлений.

Из приведенных графиков видно, что для H-плоскости ширина измеренных ДН по уровню половинной мощности существенно зависит от длины щели и слабо зависит от ее ширины. С увеличением длины щели антенны главный лепесток

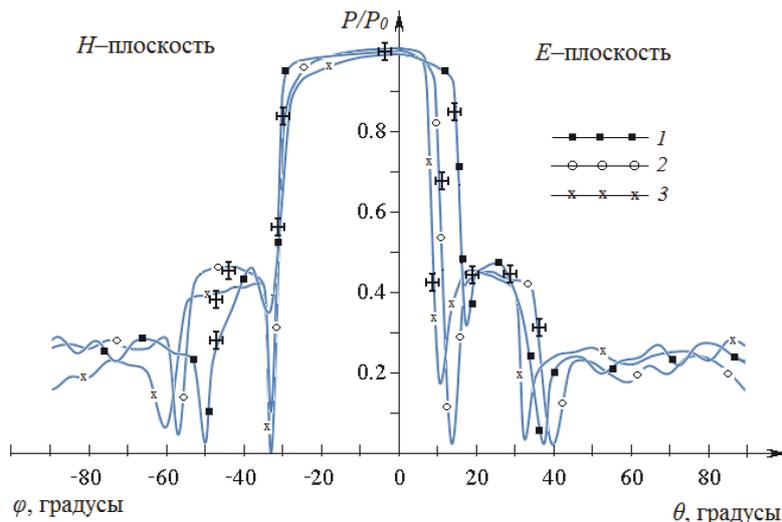


Рис. 6. Экспериментально измеренные ДН щелевых антенн при постоянной длине  $L = 9$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1);  $W = 6$  см (кривая 2) и  $W = 9$  см (кривая 3)

Fig. 6. Experimentally measured RP of slot antennas on constant length  $L = 9$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1);  $W = 6$  cm (graph 2) and  $W = 9$  cm (graph 3)

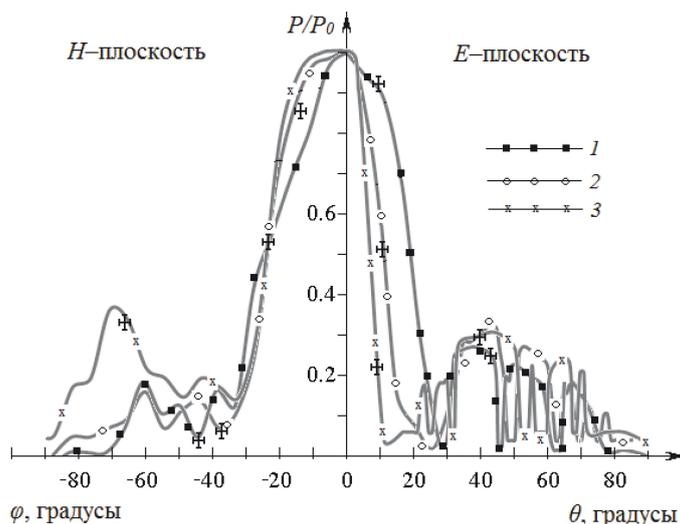


Рис. 7. Экспериментально измеренные ДН щелевых антенн при постоянной длине  $L = 15$  см для значений ширины  $W = 3$  см (кривая 1);  $W = 6$  см (кривая 2) и  $W = 9$  см (кривая 3)

Fig. 7. Experimentally measured RP of slot antennas on constant length  $L = 15$  cm for width values  $W = 3$  cm (graph 1);  $W = 6$  cm (graph 2) and  $W = 9$  cm (graph 3)

ДН сужается, что также хорошо согласуется с расчетными данными.

Во всех случаях ширина ДН в плоскости  $H$  получалась несколько шире, чем в плоскости  $E$ , что характерно и для расчетных ДН. Также видно, что у экспериментально полученных ДН вершина главного лепестка более протяженная и пологая, чем в случае расчетных ДН, что многократно подтвердилось при проведении экспериментов.

Эксперимент также показал, что форма ДН исследовавшихся ПЩА в диапазоне частот 8–12 ГГц существенно не изменялась. Уровень боковых лепестков экспериментально измеренных ДН во всех случаях был выше, чем для расчетных ДН, но не превышал значения половинной мощности.

Высокий УБЛ, вероятнее всего, объясняется конечной поверхностью исследовавшихся антенн, их неидеальной формой и наличием отражения от стенок измерительной камеры.

Возможность задания формы ДН изменением геометрических размеров щели и удобство размещения подобных ЩА на проводящих поверхностях также позволяют их апробацию и использование в составе более сложных антенных систем, например в составе дисковых антенных решеток [6; 7].

## Заключение

Для плоских симметричных щелевых антенн микроволнового диапазона с постоянной шири-

ной щели разработаны математические модели поля излучения в дальней зоне с применением тензорной функции Грина, позволяющие учесть как основную, так и кросс-поляризационную составляющую поля излучения. При этом физическая конструкция ПЩА заменялась идеально проводящей бесконечной полуплоскостью, возбуждаемой внешним сторонним электрическим полем частотой  $f_0 = 10$  ГГц (длина волны  $\lambda_0 = 3$  см).

С использованием этих моделей теоретически рассчитаны семейства диаграмм направленности исследовавшихся ПЩА в  $E$ - и  $H$ -плоскостях для значений длины щели 3 см, 9 см, 15 см и ее ширины 3 см, 6 см, 9 см. Анализ этих ДН показал, что в  $E$ -плоскости при увеличении длины щели и ее ширины ДН сужаются, что повышает их направленные свойства. При этом уровень боковых лепестков ДН уменьшается, что приводит к увеличению усилительных свойств антенн. В  $H$ -плоскости при изменении длины и ширины щели в тех же пределах ширина главного луча ее ДН по половинной мощности остается практически неизменной и несколько больше, чем для всех ДН в  $E$ -плоскости. Расчет также показал, что для идеализированного случая (бесконечная полуплоскость идеально ровная, щель регулярная и абсолютно симметричная) кроссполяризационная составляющая поля в главных плоскостях отсутствовала. В других плоскостях она имела хаотически изменяющиеся значения относительно среднего уровня  $-15$  дБ, ее максимальные значения не превышали  $-8$  дБ и не достигали уровня половинной мощности излучения.

Результаты эксперимента для аналогичных опытных образцов ПЩА, у которых длина и ши-

рина щели имели те же значения, что и модельные (рис. 2–4), показали, что их ДН имеют те же закономерности, что и расчетные ДН. Сравнительный анализ выявил, что для  $E$ -плоскости экспериментально измеренные ДН по уровню половинной мощности хорошо согласуются с теорией для значений длины щели  $L$ , когда отношение  $L/\lambda_0 \gg 1$ . Для более коротких антенн при приближении значений  $L/\lambda_0$  к 1 рассогласование между расчетными и измеренными значениями ширины ДН увеличивается и превышает значение статистической погрешности по углу (порядка  $4^\circ$ ). Экспериментально установлено, что при дальнейшем уменьшении длины ЩА форма их ДН искажалась, рассогласование с модельными представлениями существенно увеличивалось, что может свидетельствовать об ограничении возможностей использования разработанных математических моделей. Также установлено, что для  $H$ -плоскости ширина измеренных ДН по уровню половинной мощности хорошо согласуется с расчетными значениями, она тоже определяется длиной щели и слабо (в пределах статистической погрешности) зависит от ее ширины.

Эксперимент также показал, что для исследовавшихся ПЩА форма ДН существенно не изменялась в диапазоне частот 8–12 ГГц. Уровень боковых лепестков экспериментально полученных ДН во всех случаях был выше, чем для расчетных ДН, но не превышал значения половинной мощности. Высокий УБЛ у измеренных ДН, вероятнее всего, объясняется конечной поверхностью исследовавшихся антенн, их неидеальной формой и наличием отражения от стенок измерительной камеры.

### Список литературы

1. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Electromagnetic Fields and Waves. Microwaves and mmWave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics*. New York: Springer, 2019. 360 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90847-2>
2. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas: Lecture Course for Students and Engineers*. Wuhan: Scientific Research Publishing, 2012. 449 p.
3. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial // 1979 9th European Microwave Conference. 1979. P. 101–105. DOI: <https://doi.org/10.1109/euma.1979.332681>
4. Широкополосный полосковый излучающий элемент пазового типа для ФАР / Ю.А. Вайнер [и др.] // Антенны. 1980. Вып. 28. С. 95–100.
5. Заярный В.П., Парпула С.А., Гирич В.С. Излучение плоских антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрытием для дисковых антенных решеток // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 11. С. 106–111. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/41073>
6. Изучение влияния угла раскрытия плоских коротких щелевых антенн микроволнового диапазона на их электродинамические характеристики / В.П. Заярный [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 529–534. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2016/6/529>
7. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Антенна кругового обзора сверхвысокочастотного диапазона // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 10–11. С. 698–703. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2012/10/698>
8. Janaswamy R., Schaubert D. Analysis of the tapered slot antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1987. Vol. 35, no. 9. P. 1058–1065. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1987.1144218>

9. Janaswamy R., Shaubert D.H., Pozar D.M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // *Radio Science*. 1986. Vol. 21, no. 5. P. 797–804. DOI: <https://doi.org/10.1029/rs021i005p00797>
10. 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.
11. Заярный В.П., Нефёдов Е.И., Пономарев И.Н. Особенности электродинамических характеристик симметричных щелевых линий на проводящей бесконечной полуплоскости в микроволновом диапазоне // *Известия вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 4. С. 315–320. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2018/4/315>
12. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щелевых антенн бегущей волны // *Наука и образование*. 2014. № 5. С. 139–151. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/710740.html>
13. Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 220 с.
14. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона // *Известия вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 4. С. 328–336.

## References

1. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Electromagnetic Fields and Waves. Microwaves and mmWave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics*. New York: Springer, 2019, 360 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90847-2>
2. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas: Lecture Course for Students and Engineers*. Wuhan: Scientific Research Publishing, 2012, 449 p.
3. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial. 1979 *9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101–105. DOI: <https://doi.org/10.1109/euma.1979.332681>
4. Vajner Yu.A. et al. Slot-type broadband strip radiator for PAR. *Antenny*, 1980, no. 28, pp. 95–100 (In Russ.)
5. Zayarnyi V.P., Parpula S.A., Girich V.S. Radiation of flat microwave antennas with linearly expanding aperture for disk antenna arrays. *Zhurnal tehnikeskoy fiziki*, 2014, vol. 84, no. 11, pp. 106–111. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/41073> (In Russ.)
6. Zayarnyi V.P. et al. Study of the influence of the aperture angle of flat short slot antennas of the microwave range on their electrodynamic characteristics. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 529–534. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2016/6/529> (In Russ.)
7. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarnyi V.P. Ultrahigh frequency circular antenna. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2012, vol. 55, no. 10–11, pp. 698–703. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2012/10/698> (In Russ.)
8. Janaswamy R., Schaubert D. Analysis of the tapered slot antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1987, vol. 35, no. 9, pp. 1058–1065. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1987.1144218>
9. Janaswamy R., Shaubert D.H., Pozar D.M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna. *Radio Science*, 1986, vol. 21, no. 5, pp. 797–804. DOI: <https://doi.org/10.1029/rs021i005p00797>
10. Nefyodov E.I., Ponomarev I.N. Excitation of a perfectly conducting half-plane by an expanding slit cut perpendicular to its edge. *Elektrodinamika i tehnika SVCh, KVCh i opticheskikh chastot*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 58–84 (In Russ.)
11. Zayarnyi V.P., Nefyodov E.I., Ponomarev I.N. Features of the electrodynamic characteristics of symmetric slot lines on a conducting infinite half-plane in the microwave range. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 315–320. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/2018/4/315> (In Russ.)
12. Vilenskij A.R. Method for analysis of space-time characteristics of radiation of printed traveling-wave slot antennas. *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 5, pp. 139–151. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/710740.html> (In Russ.)
13. Zayarnyi V.P. *Radiophysical Properties of Charge-Coupled Solid-State Layered Structures: Methods and Informational Possibilities for Their Determination*. Moscow: Radio i svjaz', 2001, 220 p. (In Russ.)
14. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarnyi V.P. Study of the electrodynamic characteristics of antennas and antenna systems in the microwave range. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2009, vol. 52, no. 4, pp. 328–336. (In Russ.)

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 1, pp. 22–31

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.1.22-31

Received 2 August 2020  
Accepted 7 September 2020

### Development of exact mathematic models for planar slotted traveling wave antennas using the dyadic Green function and their experiment foundation

Eugeniy I. Nefyodov<sup>1</sup>, Vyacheslav P. Zayarnyi<sup>2</sup>, Nina I. Kiryanova<sup>3</sup>, Igor N. Ponomarev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics  
named after V.A. Kotelnikov (Russian Academy of Sciences)  
1, Vvedenskogo Square,  
Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia

<sup>2</sup> Volgograd State Technical University

28, Lenin Avenue,

Volgograd, 400005, Russia

<sup>3</sup> Volgograd State University

100, Universitetskii Avenue,

Volgograd, 400062, Russia

*Abstract* – Exact mathematic models were developed for traveling wave antennas with a constant slot width based on the dyadic Green function, taking into account both the main and cross-polarization components of the field in the far radiation zone. The possibility of using these models as basic models for studying the electrodynamic properties of traveling wave antennas with a different slot configuration (linearly, exponentially tapering, etc.) is justified. The influence of the geometric parameters of the investigated traveling wave antennas on their characteristics was studied by means of using the established mathematic models. It has been found that in the electrodynamic E plane, with an increase of the length and width of the slot, the main beam of the radiation pattern narrows, which leads to an increase the directed properties of the antennas. In the electrodynamic H plane, the width of the main beam of radiation pattern decreases only as the length of the slot of traveling wave antennas increases and does not depend on its width in practice. It was shown that the established theory results of the study are well consistent with the results of experiments, which also revealed the limitations of the applicability of the developed models. Analysis of traveling wave antennas characteristics was carried out at central frequency of 10 GHz in the frequency range of 8-12 GHz.

*Keywords* – traveling wave antenna, symmetric slot line, constant width slot, ideal half plane, radiation pattern, microwave range.

## Информация об авторах

**Нефёдов Евгений Иванович**, 1932 г. р., доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия. Окончил радиотехнический факультет Военной Краснознаменной инженерной академии связи имени С.М. Буденного (г. Ленинград) в 1956 г. С 1961 г. по настоящее время работает во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН. Академик Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова, Академии медико-технических наук, Академии военных наук и Международной академии информатизации. Автор 30 книг, 50 изобретений и 250 статей. Подготовил к защите более 20 кандидатов и 10 докторов наук. Награжден знаками «Почетный радист СССР» и «Почетный радист РФ». Создатель ряда приоритетных научных школ.

*Область научных интересов:* асимптотическая теория дифракции, системы сверхбыстрой обработки информации на объемных интегральных схемах СВЧ-, КВЧ- и оптических частот, теория единого информационного поля ноосферы.

*E-mail:* nefyodov32@mail.ru

**Заярный Вячеслав Петрович**, 1954 г. р., доктор технических наук (2002 г.), профессор, заведующий кафедрой экспериментальной физики Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ), г. Волгоград, Россия. Окончил радиотехнический факультет Уральского политехнического института (УПИ, г. Свердловск) в 1978 г. по специальности «Радиоэлектронные устройства». До 1984 г. работал в одном из оборонных НИИ, затем поступил в очную аспирантуру (УПИ, физико-технический факультет), которую окончил с защитой кандидатской диссертации (кандидат физико-математических наук, 1988 г.). Академик метрологической академии РФ. Имеет более 200 научных публикаций. Член диссертационного совета Д 212.028.05 ВолгГТУ.

*Область научных интересов:* электроника (в т. ч. физическая электроника, электроника СВЧ и КВЧ), радиоэлектроника, измерительные преобразователи, датчики, измерительные системы (в т. ч. информационно-измерительные системы), физический эксперимент.

*E-mail:* zvp2000@mail.ru

**Кирьянова Нина Ивановна**, 1949 г. р., кандидат экономических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем института приоритетных технологий Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия. Окончила Куйбышевский электротехнический институт связи в 1976 г. и имеет квалификацию инженера автоматической электросвязи.

## Information about the Authors

**Eugeniy I. Nefyodov** was born in 1932, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, chief researcher of the Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov (Russian Academy of Sciences), Fryazino, Moscow region, Russia. He graduated from Radio Engineering Faculty of Military Engineering Communication Academy named S.M. Budyonny (Leningrad city) in 1956 as radio engineer. From 1961 to the present day, he has been working at the the Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov (Russian Academy of Sciences). He is a full member of the Academy of Engineering Sciences named A.M. Prokhorov, of the Academy of Military Sciences, of the Academy of Medical Technical Sciences, and of the International Academy of Informatization. He is the author of 30 books, 50 patents and 250 scientific papers. Under his scientific supervision, more than 20 graduate students received a Ph.D. degree and more than 10 people received a doctorate degree. He was awarded the Honorary Radio Operator of the USSR and the Honorary Radio Operator of Russia. He is a creator of a number of priority scientific schools.

*Research interests:* asymptotic diffraction theory, ultra-fast information processing systems on three dimensional integrated circuits of microwave and optical frequencies, the theory of a single information field of the noosphere.

*E-mail:* nefyodov32@mail.ru

**Vyacheslav P. Zayarnyi** was born in 1954, Doctor of Technical Sciences (2002), professor, head of the Department of Experimental Physics, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. He graduated from the Ural Technical Institute (Sverdlovsk city) in 1978 as an engineer specializing in radio electronic systems. Until 1984, he worked in one of the military defense research institutes and then he entered full-time post graduate school on the Faculty of Physics and Technology of the Ural Technical Institute. He received his candidate of physic and mathematic sciences degree in 1988 and his doctor of technical sciences degree in 2002. He is an academician of the Academy of Metrology of the Russian Federation. He has more than 200 scientific papers. He is a full member of the dissertation council D 212.028.05 (Volgograd State Technical University).

*Research interests:* electronics (including physical electronics and microwave electronics), radio electronics, measuring systems (including information and measurement systems), physical experiment.

*E-mail:* zvp2000@mail.ru

**Nina I. Kiryanova** was born in 1949, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Telecommunication Systems, Institute of Priority Technologies, Volgograd

Работала инспектором в Государственном надзоре за связью по Волгоградской области. С 2002 г. преподает в Волгоградском государственном университете. В 2008 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Развитие инфокоммуникаций в России в условиях перехода к информационному обществу».

*Область научных интересов:* сети и системы электросвязи, построение телекоммуникационных систем и сетей с применением беспроводных технологий.

*E-mail:* nikiryanova@mail.ru

**Пономарев Игорь Николаевич**, 1963 г. р., старший преподаватель Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия. Окончил Таганрогский радиотехнический институт имени В.Д. Калмыкова в 1986 г. по специальности «Радиотехника». Окончил заочную аспирантуру под руководством доктора физико-математических наук, профессора Е.И. Нефёдова (ФИРЭ РАН, г. Фрязино). Тема диссертации связана с исследованием плоских антенн бегущей волны СВЧ-диапазона. Имеет более 20 научных публикаций.

*Область научных интересов:* решение граничных задач электродинамики и математическое моделирование антенн и устройств согласования микроволнового диапазона.

*E-mail:* ponomarev.igor@volsu.ru

State University, Volgograd, Russia. She graduated from Kuibyshev Electro Engineering Institute of Communications in 1976 as an engineer of automatic telecommunication. She worked as an inspector in the State supervision of communications in the Volgograd Region. From 2002 to the present day, she teaches students at Volgograd State University. In 2008, she defended her thesis on the topic «The development of information communications in Russia in the context of the transition to the information society» and received a Ph.D. in economics.

*Research interests:* telecommunication networks and systems, building telecommunication systems and networks using wireless technologies.

*E-mail:* nikiryanova@mail.ru

**Igor N. Ponomarev** was born in 1963, senior lecturer of the Volgograd State University, Volgograd, Russia. He graduated from Taganrog Radio Engineering Institute named after V.D. Kalmykov in 1986 as radio engineer. He graduated from correspondence graduate school under the guidance of Dr. Ph.D., professor Nefyodov E.I. at the Fryazino Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotelnikov (Russian Academy of Sciences) (Fryazino, Moscow Region, Russia). The topic of his dissertation is associated with the study of planar antennas of the traveling wave of the microwave band. He has more than 20 scientific papers.

*Research interests:* the solution of boundary problems of electrodynamics and mathematical modeling of microwave antennas and matching devices.

*E-mail:* ponomarev.igor@volsu.ru