Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.677.71

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24>

Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS

В. Г. Кошкидько[✉], М. М. Мигалин

Институт радиотехнических систем и управления
Южного федерального университета, Таганрог, Россия

[✉]kvg59@mail.ru

Аннотация

Введение. Направление максимального излучения резонансных волноводно-щелевых антенных решеток совпадает с нормалью к продольной оси антенны. Такие антенны хорошо согласованы с питающей линией только в узкой полосе частот. При большом количестве элементов решетки даже незначительное отклонение от рабочей частоты приводит к существенному искажению диаграммы направленности. Устранение этих искажений в рабочей полосе частот становится актуальной задачей.

Цель работы. Сохранение в рабочей полосе частот неискаженной формы диаграммы направленности линейной резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, построенной на основе продольных щелей на широкой стенке прямоугольного волновода.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи применено разбиение волноводно-щелевой антенной решетки на несколько подрешеток. Построение модели исследуемой структуры и анализ ее направленных свойств проведены в САПР Ansys HFSS с использованием макросов на языке Visual Basic Scripting Edition.

Результаты. В САПР Ansys HFSS разработаны 3 модели волноводно-щелевых антенных решеток, состоящие из двух, четырех и восьми подрешеток. Исследовано влияние разбиения антенны на подрешетки на диаграмму направленности на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона. Показано, что при разбиении антенны на подрешетки ширину главного лепестка диаграммы направленности на крайних частотах удается уменьшить с 2.4 до 1.0° и сравнить со значением этого параметра на центральной частоте.

Заключение. Исследования показали, что разбиение резонансной волноводно-щелевой антенной решетки на подрешетки является эффективной мерой, позволяющей добиться сохранения неискаженной диаграммы направленности в рабочей полосе частот. Сравнение полученных результатов с характеристиками антенны, не имеющей разбиения на подрешетки, показывает, что в области главного лепестка диаграммы направленности на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона совпадают с графической точностью, а уровень боковых лепестков не превышает –20 дБ.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна, подрешетки, полоса рабочих частот, САПР, макрос, VBScript

Для цитирования: Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Исследование частотной зависимости диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенной решетки, состоящей из подрешеток, в САПР Ansys HFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 15–24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.05.2020; принята к публикации после рецензирования 03.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020

Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS

Vladimir G. Koshkid'ko✉, Mikhail M. Migalin

Radio engineering systems and control institute
of Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉kvg59@mail.ru

Abstract

Introduction. A resonant slotted waveguide antenna allows providing broadside radiation, which coincides with the normal line to the longitudinal axis of the array. Such an antenna can be well-matched in a very narrow frequency band. Even a slight deviation from the operating frequency leads to a significant distortion of the radiation pattern. In this regard, the distortion of the radiation pattern is becoming an urgent task.

Aim. The main objective of this work is to preserve the radiation pattern of the resonant slotted waveguide antenna with longitudinal slots in the broad face in operating bandwidth.

Materials and methods. Subarraying was performed to preserve the undistorted radiation pattern of the slotted waveguide antenna array in the operating bandwidth. The antenna model and its directional properties were analyzed in CAD Ansys HFSS using Visual Basic Scripting Edition macros.

Results. Three slotted waveguide antennas' models, consisting of two, four, and eight subarrays were developed in Ansys HFSS CAD. The effect of subarraying on the radiation pattern at the center frequency and the upper and the lower operating frequencies is studied. It is shown that the growing number of subarrays leads to a more stable radiation pattern in the operating bandwidth.

Conclusions. Full-wave electromagnetic simulations have shown that subarraying of a resonant slotted waveguide antenna is a useful measure that preserves undistorted radiation pattern in the operating frequency band. Usage of Visual Basic Scripting Edition macros allows to minimizing the time spent creating a model in CAD Ansys HFSS.

Keywords: slotted waveguide antenna, subarraying, operating frequency band, CAD, macros, VBScript

For citation: Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Investigation of a Radiation Pattern Frequency Dependence of a Subarrayed Slotted Waveguide Antenna Using CAD Ansys HFSS. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 15-24. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-15-24

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 21.05.2020; accepted 03.07.2020; published online 29.09.2020

Введение. Волноводно-щелевые антенны (ВЩА) широко применяются как в системах связи, так и в радиолокации, поскольку имеют высокие направленные свойства, компактные размеры, невыступающий профиль, высокую эффективность излучения и простоту подведения питания. Разработке общей теории ВЩА посвящены работы как отечественных ученых [1–13], так и зарубежных исследователей [14–23]. Достаточно подробный обзор развития решений синтеза ВЩА представлен в [12, 13].

Существует несколько методов расчета резонансных ВЩА: метод последовательных приближе-

ний, метод рекуррентных соотношений, энергетический метод [1].

Выбор метода синтеза ВЩА определяется числом допущений при расчете антенны. По мере распространения электромагнитных волн они затухают в связи с потерями на излучение и тепловыми потерями. Излучение щелей как во внутреннее, так и во внешнее относительно волновода пространство вызвано протекающими по внутренним стенкам волновода токами. Близкорасположенные щелевые излучатели взаимодействуют между собой, что выражается в изменении их эквивалентных импедансов.

Щели представляют собой неоднородности для распространяющегося поля и вызывают в волноводе появление высших типов волн. Основной вклад во взаимодействие излучателей вносит волна основного типа, что ведет к отклонению амплитудно-фазового распределения от требуемого. Из-за этого наблюдается отклонение реализуемой диаграммы направленности (ДН) от заданной.

Для учета взаимодействия щелей как во внешнем, так и во внутреннем пространстве, а также учета как основного, так и высших типов волн применяются строгие в электродинамическом отношении методы на основе интегральных уравнений. Однако громоздкость и трудоемкость вычислений существенно усложняют использование данного метода при проектировании ВЩА.

В случае, когда для учета взаимодействия щелей учитывается только основной тип волны в волноводе и учитывается взаимодействие только по внутреннему пространству, применяется метод рекуррентных соотношений. Данный метод заключается в определении мощности и фазы излучения каждого излучателя при помощи теории четырехполюсников.

Наиболее простым методом синтеза ВЩА является энергетический метод. Данный метод не учитывает взаимодействия щелей ни по внешнему, ни по внутреннему пространствам. Метод предполагает, что в прямоугольном волноводе фазовый сдвиг между соседними щелевыми излучателями равен электрическому расстоянию между ними, а фазовое распределение в раскрыве волноводно-щелевой антенны – линейное. Несмотря на простоту, уже для числа щелей $N \geq 15$ энергетический метод дает результаты, достаточно близкие к полученным строгими методами [1]. Поэтому для расчета исследуемой антенны был использован энергетический метод.

В системах связи часто используются сигналы сложной формы, обладающие широким спектром, что выдвигает требования к сохранению формы ДН ВЩА в полосе частот. В [24, 25] представлены результаты проектирования и анализа линейной резонансной ВЩА для рабочей частоты 10.8 ГГц, содержащей 88 продольных щелей на широкой стенке прямоугольного волновода.

На указанной частоте ДН ВЩА имеет классическую форму, полностью удовлетворяющую требованиям технического задания. Однако при отклонении от центральной частоты ДН претерпевает значительные искажения. На рис. 1 пред-

Рис. 1. Диаграмма направленности резонансной

волноводно-щелевой антенны при количестве щелей $N = 88$

Fig. 1. Radiation Pattern of a Resonant Waveguide-Slot Antenna with the Number of Slots $N = 88$

ставлены ДН антенны $F(\theta)$ для центральной частоты $f_2 = 10.8$ ГГц и для крайних частот рабочего диапазона ($f_1 = 10.7$ ГГц, $f_3 = 10.9$ ГГц).

Как следует из рис. 1, на крайних частотах главный лепесток ДН расширился в 1.5 раза, вблизи нормали к поверхности решетки появился провал, а также увеличился уровень боковых лепестков (УБЛ).

Очевидно, что искажение ДН происходит из-за частотной зависимости набег фаз между щелями и связанным с этим нарушением синфазности возбуждения излучателей в ВЩА.

В [23] показано, что полоса рабочих частот ВЩА уменьшается при увеличении числа щелей и определяется соотношением

$$\Delta f = \frac{c}{2a} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{N - 0.25 a}{N - 0.5 d} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{N - 0.75 a}{N - 0.5 d} \right)^2} \right\},$$

где c – скорость света; a – ширина широкой стенки прямоугольного волновода, на которой расположены щели; N – количество щелей; $d = \lambda_B/2$ – шаг ВЩА, причем

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - [\lambda/(2a)]^2}}$$

– длина волны в волноводе (λ – длина волны в свободном пространстве).

В связи с этим одним из методов обеспечения работы ВЩА в полосе частот является разбиение антенны на подрешетки [14, 16, 23].

В настоящей статье исследуется изменение формы ДН ВЩА на центральной частоте и на

крайних частотах рабочего диапазона в зависимости от количества подрешеток с помощью САПР Ansys HFSS.

Постановка задачи. Требуется расширить диапазон рабочих частот ВЦА с излучением в направлении нормали к широкой стенке, описанной в [24]. Необходимо получить следующие параметры антенны:

- диапазон рабочих частот 10.8 ± 0.1 ГГц;
- ширина главного лепестка ДН в Н-плоскости 1° ;
- УБЛ в Н-плоскости -20 дБ;
- максимум ДН направлен перпендикулярно оси ВЦА;
- поляризация вертикальная;
- излучаемая мощность менее 5 Вт.

Конструкция ВЦА. Для оценки эффективности примененного метода необходимо построить эталонную ВЦА, с характеристиками которой будет сравниваться ДН антенны, разбитой на подрешетки. В качестве эталонной рассмотрим ВЦА на основе прямоугольного волновода стандартного сечения $a = 23$ мм, $b = 10$ мм, закороченного с обеих сторон (рис. 2). Вертикальная поляризация излучения реализована размещением продольных щелей в шахматном порядке на широкой стенке волновода. Для обеспечения заданного УБЛ принято распределение поля $f(z)$ вида "косинус в квадрате на пьедестале" [26]. Шаг ВЦА выбран равным $d = \lambda_B/2$ для синфазного возбуждения щелей, что обеспечивает направление максимума излучения перпендикулярно оси антенны ($\theta = 90^\circ$).

При выбранном шаге ВЦА d подавление дифракционных максимумов осуществляется при выполнении условия [1]

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \cos(\theta)}. \quad (1)$$

При $\theta = 90^\circ$ условие (1) примет вид $d \leq \lambda$, что при выбранном шаге ВЦА d для основного типа волны H_{10} выполняется всегда.

Количество щелей N , необходимое для обеспечения заданной ширины ДН в Н-плоскости, можно найти из формулы, приведенной в [1]:

$$2\theta_{0.5}^H = \frac{57.4\lambda}{Nd}. \quad (2)$$

Сделав необходимые преобразования, из (2) получим число щелей $N = 92$. В результате моделирования в САПР Ansys HFSS [24] получено, что для достижения требуемой ширины ДН в Н-плоскости число щелей можно сократить до $N = 88$.

Согласно энергетическому методу, при входной проводимости ВЦА, равной $g_{ВХ}$, эквивалентная нормированная проводимость n -й щели g_n может быть рассчитана через распределение поля $f(z)$ по формуле [1]

$$g_n = g_{ВХ} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{m=1}^N f^2(z_m)}. \quad (3)$$

Согласно [27] для обеспечения согласования антенны с питающим волноводом нормированная входная проводимость должна быть выбрана следующим образом: $g_{ВХ} = 1$ при возбуждении ВЦА с одного из концов и $g_{ВХ} = 2$ при возбуждении в центре.

Рис. 2. Модель эталонной волноводно-щелевой антенны: 1, 3 – короткозамыкатели; 2 – порт

Fig. 2. Model of the reference waveguide-slot antenna: 1, 3 – short circuits; 2 – port

С другой стороны, проводимость продольной щели на широкой стенке прямоугольного волновода определяется соотношением [1]

$$g_n = 2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x_n}{a} \right), \quad (4)$$

где x_n – расстояние (сдвиг) продольной оси n -й щели от средней линии (оси) волновода.

Для построения модели антенны необходимо знать координаты каждой щели. Положение центра n -й щели вдоль оси z относительно короткозамыкателя волновода определяется выражением

$$z_n = (2n - 1)(\lambda_B/4), \quad n = 1 \dots N. \quad (5)$$

Сдвиг n -й щели относительно средней линии широкой стенки волновода рассчитывается по формуле, полученной из (4):

$$x_n = \frac{a}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{g_n}{2.09 \frac{a \lambda_B}{b \lambda} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B} \right)}}. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в настоящей статье не учитывается явление изменения резонансной длины щели, вызванное как конечной толщиной стенки волновода, так и смещением излучающих щелей относительно его средней линии [15].

Построение модели эталонной резонансной ВЩА в САПР Ansys HFSS. Для анализа направленных свойств эталонной ВЩА проведено моделирование в САПР Ansys HFSS. Модель ВЩА состоит из горизонтально расположенного излучающего волновода с идеально проводящими стенками, закороченного с обеих сторон, на широкой стенке которого расположено 88 продольных щелей (рис. 2).

Массивы координат щелей x_n , z_n рассчитывались и формировались в пакете компьютерной алгебры Mathcad с использованием выражений (3), (5) и (6). Эти массивы из Mathcad экспортировались в текстовые файлы. При построении модели ВЩА в САПР Ansys HFSS использовались описанные в [24, 27, 29] макросы на языке Visual Basic Scripting Edition (VBScript), с помощью которых описано "вырезание" поочередно всех щелей на широкой стенке прямоугольного волновода по координатам из текстовых файлов, сформированным в Mathcad.

Ширина щелей принята равной 1 мм, что обеспечило невысокую добротность и достаточную электрическую прочность [1]. Длину ВЩА L определяют z -координата центра последней щели и расстояние $\lambda_B/4$ до короткозамыкателя.

ДН эталонной модели ВЩА на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона представлены на рис. 1 [24].

Построение модели резонансной ВЩА с подрешетками в САПР Ansys HFSS. Отличием модели резонансной ВЩА с подрешетками (фрагмент такой ВЩА представлен на рис. 3) от эталонной модели является наличие идеально проводящих перегородок (рис. 3, 3) внутри излучающего волновода (рис. 3, 1), которые разбивают исследуемую ВЩА на подрешетки. Каждая подрешетка возбуждается при помощи питающего волновода (рис. 3, 4) через наклонную возбуждающую щель (рис. 3, 6), прорезанную в соприкасающихся широких стенках под углом $\alpha = 45^\circ$ к продольной оси волновода. Каждый питающий волновод закорочен с одной стороны (рис. 3, 7), а с другой – возбужден волноводным портом (рис. 3, 5) с основным типом волны H_{10} . Расстояние от центра питающей щели

Рис. 3. Возбуждение одной из подрешеток волноводно-щелевой антенны: 1 – излучающий волновод; 2 – излучающая щель; 3 – перегородка; 4 – питающий волновод; 5 – порт; 6 – возбуждающая щель; 7 – короткозамыкатель

Fig. 3. Excitation of one of the sublattices of the waveguide-slot antenna: 1 – radiating waveguide; 2 – radiating slot; 3 – partition; 4 – supply waveguide; 5 – port; 6 – energize slot; 7 – short circuit

Рис. 4. Волноводно-щелевые антенны, состоящие из нескольких подрешеток:
 а – 2 подрешетки; б – 4 подрешетки; в – 8 подрешеток

Fig. 4. Waveguide-slot antennas, consisting of multiple subarrays: а – two sublattices; б – four sublattices; в – eight sublattices

до короткозамыкателя питающего волновода составляет $\lambda_B/2$.

Результаты моделирования ВЩА с подрешетками в САПР Ansys HFSS. Для исследования изменения формы ДН ВЩА в зависимости от количества подрешеток на центральной частоте и на крайних частотах рабочего диапазона ВЩА была разделена на 2, 4 и 8 подрешеток идеально проводящими перегородками (рис. 4). Количество щелей в подрешетках составило: при двух подрешетках (рис. 4, а) $N_2 = 44$; при четырех (рис. 4, б) $N_4 = 22$; при восьми подрешетках (рис. 4, в) $N_8 = 11$.

В ВЩА с двумя и четырьмя подрешетками щели во всех питающих волноводах наклонены на одинаковый угол α . В антенне с восемью подрешетками щели в питающих волноводах соседних подрешеток расположены встречно-наклонно. Такое различие вызвано тем, что в первых двух случаях количество щелей в подрешетках является четным, а в третьем случае – нечетным.

На рис. 5 приведены результаты моделирования антенны, состоящей из двух подрешеток. Как следует из него, на центральной частоте диапазона

Рис. 5. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из двух подрешеток

Fig. 5. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of two subarrays

Рис. 6. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из четырех подрешеток

Fig. 6. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of four subarrays

Рис. 7. Диаграмма направленности резонансной волноводно-щелевой антенны, состоящей из восьми подрешеток

Fig. 7. Radiation pattern of a resonant waveguide-slot antenna, consisting of eight subarrays

$f_2 = 10.8$ ГГц форма ДН $F(\theta)$ с высокой точностью совпадает с ДН эталонной ВЩА (см. рис. 1), полученной в [24]. На крайних частотах рабочего диапазона по сравнению с ДН, приведенными на рис. 1, во-первых, исчез провал в центральной части главного лепестка ДН; во-вторых, ширина ДН приблизилась к значению $2\theta_{0.5}^H = 1^\circ$, соответствующему ширине ДН на центральной частоте (на

нижней частоте $f_1 = 10.7$ ГГц ширина ДН $2\theta_{0.5}^H = 1.1^\circ$, на верхней частоте $f_3 = 10.9$ ГГц $2\theta_{0.5}^H = 0.9^\circ$). Однако значение УБЛ осталось еще достаточно высоким (-14 дБ).

На рис. 6 приведены результаты моделирования антенны, состоящей из четырех подрешеток. Заметно улучшение ДН $F(\theta)$ на крайних частотах по сравнению с рис. 5 как в области главного, так и боковых лепестков. Так, ширина главного лепестка ДН стала одинаковой на крайних частотах и достигла значения $2\theta_{0.5}^H = 1.04^\circ$, хотя еще имеются различия в форме ДН на нижней и верхней частотах (на нижней частоте ДН в области первых двух боковых лепестков имеет классический вид, а на верхней частоте из-за расширения первого бокового лепестка провал между ним и центральным лепестком почти исчезает). УБЛ снизился и фактически приблизился к его значению на центральной частоте (-19 дБ).

Результаты моделирования антенны, состоящей из восьми подрешеток, приведены на рис. 7. Форма ДН $F(\theta)$ этой ВЩА на центральной и на крайних частотах рабочего диапазона фактически идентична в пределах главного лепестка. Ширина ДН во всей полосе частот составляет $2\theta_{0.5}^H = 1^\circ$. Боковые лепестки на крайних частотах как по форме, так и по уровню приближены к значению УБЛ на центральной частоте, равному -20 дБ.

Заключение. Исследования показали, что разбиение резонансной ВЩА на подрешетки является эффективной мерой, позволяющей добиться сохранения неискаженной ДН в рабочей полосе частот. Сравнение полученных результатов с характеристиками антенны, не имеющей разбиения на подрешетки, показывает, что разбиение резонансной ВЩА-решетки всего лишь на две подрешетки позволяет устранить провал в центральной части главного лепестка ДН, а также уменьшить ширину главного лепестка ДН на крайних частотах более чем в 2 раза (с 2.4 до 1.1°) и приблизиться к значению этого параметра на центральной частоте. Дальнейшим увеличением количества подрешеток можно добиться того, что в области главного лепестка ДН на центральной и крайних частотах рабочего диапазона будут совпадать с графической точностью, а уровень боковых лепестков не будет превышать требуемого значения (при моделировании оно принято равным -20 дБ и достигнуто при разделении ВЩА на 8 подрешеток).

Список литературы

1. Воскресенский Д. И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование антенных решеток: учеб. пособие для вузов; под. ред. Д. И. Воскресенского. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
2. Вешникова И. Е., Евстропов Г. А. Теория согласованных щелевых излучателей // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10, № 7. С. 1181–1189.
3. Евстропов Г. А., Царапкин С. А. Расчет волновоодно-щелевых антенн с учетом взаимодействия излучателей по основной волне // Радиотехника и электроника. 1966. Т. 11, № 5. С. 822–830.
4. Лось В. Ф., Космодамианская Н. С. Метод расчета амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве волновоодно-щелевой решетки с учетом внутреннего взаимодействия излучателей // Антенны. 1974. Вып. 20. С. 24–32.
5. Яцук Л. П., Жиронкина А. В., Катрич А. В. Возбуждение прямоугольного волновода наклонной и крестообразной щелями // Антенны. 1975. Вып. 22. С. 46–59.
6. Ершов Л. И., Кременецкий С. Д., Лось В. Ф. Электродинамика взаимовлияния в нерезонансных волновоодно-щелевых решетках // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21, № 2. С. 48–54.
7. Электродинамические факторы взаимной связи при проектировании волновоодно-щелевых решеток / Л. Д. Бахрах, Л. И. Ершов, С. Д. Кременецкий, В. Ф. Лось // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 2. С. 314–317.
8. Ряполов В. В. Расчет волновоодно-щелевых резонансных антенн с продольными излучающими щелями // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. Вып. 2 (374). С. 29–33.
9. Иванов М. А., Ряполов В. В., Хавкина Т. А. Расчет волновоодно-щелевых резонансных антенных решеток // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1990. Вып. 10 (434). С. 9–13.
10. Кошкина Т. В., Максимов О. М. Влияние толщины стенки волновода на резонансную длину излучающих узких прямоугольных щелей // Антенны. 2003. № 12. С. 49–54. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1966> (дата обращения 22.03.2020).
11. Банков С. Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013. 416 с.
12. Кременецкий С. Д., Лось В. Ф., Шаманов А. Н. Волновоодно-щелевые антенные решетки // Антенны. 2004. № 8–9. С. 47–55. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1879> (дата обращения 22.03.2020).
13. Кашин А. В. Методы проектирования и исследования волновоодно-щелевых антенных решеток // Антенны. 2006. № 3. С. 3–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9213036> (дата обращения 22.03.2020).
14. Richardson P. N., Lee H. Y. Design and Analysis of Slotted Waveguide Arrays // Microwave J. 1988. № 6. P. 109–125. doi: 10.1002/1098-2760(20001220)27:63.3.CO;2-J
15. Stern G., Elliott R. Resonant Length of Longitudinal Slots and Validity of Circuit Representation. Theory and experiment // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1985. Vol. 33, № 11. P. 1264–1271. doi: 10.1109/TAP.1985.1143509
16. Coetzee J., Joubert J. W., Tan L. Frequency Performance Enhancement of Resonant Slotted Waveguide Arrays through the Use of Wideband Radiator or Subarraying // Microwave and Optical Technology Lett. 1999. Vol. 22. P. 35–39.
17. Park P. K., Pavlov I. Yu. Characterization of Dumbbell Slots in Rectangular Waveguide by Method of Moments // Proc. 1984 Antennas Applications Symp., IL, USA, Sept. 1984. Piscataway: IEEE, 1984. P. 1–6.
18. Elliott R. S., Kurtz L. A. The Design of Small Slot Arrays // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1978. Vol. AP-26, iss. 2. P. 214–219. doi: 10.1109/TAP.1978.1141814
19. Elliott R. S. On the Design of Traveling-Wave-Fed Longitudinal Shunt Slot Arrays // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1979. Vol. AP-27, iss. 5. P. 717–720. doi: 10.1109/TAP.1979.1142166
20. Elliott R. S. An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31, № 1. P. 48–53. doi: 10.1109/TAP.1983.1143002
21. Elliott R. S., O'Loughlin W. R. The Design of Slot Arrays including Internal Mutual Coupling // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986. Vol. AP-34, № 9. P. 1149–1154. doi: 10.1109/TAP.1986.1143947
22. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New York: John Wiley & Sons, 2003. 612 p.
23. Sekretarov S. S., Vavriv D. M. A Wideband Slotted Waveguide Antenna Array for SAR Systems // Progress in Electromagnetics Research M. 2010. Vol. 11. P. 165–176. URL: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm11/14.10010606.pdf> (дата обращения 22.03.2020).
24. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653
25. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Разработка линейной эквидистантной волновоодно-щелевой антенной решетки и анализ ее направленных свойств // Антенны. 2018. № 2. С. 15–20. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (дата обращения 22.03.2020).
26. Семенихин А. И., Кошкидько В. Г., Климов А. В. Проектирование зеркальных антенн с помощью пакета Mathcad: учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. 80 с. URL: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800914249/> (дата обращения: 22.03.2020).
27. Johnson R. C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. 2nd ed. Portland: McGraw-Hill, 1993. 1408 p.
28. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide

Antenna Consisting of Subarrays// 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway: IEEE, 2017. P. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019. 8792768

29. Кошкидько В. Г., Мигалин М. М. Применение макросов языка VBScript при моделировании волноводно-щелевых антенн в САПР AnsysHFSS // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17

Информация об авторах

Кошкидько Владимир Георгиевич – кандидат технических наук (1988), доцент (1993) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета г. Таганрога. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2008). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – исследования в области электромагнетизма и прикладной электродинамики (рассеяние электромагнитных волн импедансными структурами; импедансные, щелевые и микрополосковые электродинамические структуры; микрополосковые антенны; антенны с реактивными нагрузками).

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер, д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Мигалин Михаил Михайлович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2020), аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета г. Таганрога. Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – исследование периодических антенных структур, фазированные антенные решетки и анализ диэлектрических свойств материалов.

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер, д. 44, г. Таганрог, Ростовская область, 347928, Россия

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>

References

1. Voskresenky D. I. Microwave devices and antennas. Antenna array design: Textbook for universities; editor D. I. Voskresenky. 4th ed. M.: Radiotekhnika, 2012, 744 p. (In Russ.)

2. Veshnikova I. E., Evstropov G. A., Theory of matched slot radiators. *Radiotekhnika and electronica*. 1965, vol. 10, no. 7, pp. 1181–1189. (In Russ.)

3. Evstropov G. A, Tsarapkin S. A. Calculation of waveguide-slot antennas given the TE₁₀ interaction of emitters. *Radiotekhnika and electronica*. 1966, vol. 11, no. 5, pp. 822–830. (In Russ.)

4. Los V. F., Kosmodamianskaya N. S. The amplitude-phase distribution calculation method of the field in the aperture of the slotted waveguide array in consideration of the internal interaction of the emitters. *Antenny*. 1974, vol. 20, pp. 24–32. (In Russ.)

5. Yatsuk L. P., Zhironkina A. V., Katrich A. V. Excitation of a rectangular waveguide by inclined and cruciform slots. *Antenny*. 1975, no. 22, pp. 46–59. (In Russ.)

6. Ershov L. I., Kremenetsky S. D., Los V. F. Electrodynamics of mutual coupling in nonresonant slotted waveguide antennas. *Izv. Vuzov, Ser. Radioelectronica*, 1978, vol. 21, no. 2, pp. 48–54. (In Russ.)

7. Bakhrakh L. D., Ershov L. I., Kremenetsky S. D., Los V. F. Consideration of the electrodynamic factors of mutual coupling in the design of slotted waveguide antennas. *Rep. of the USSR Academy of Sciences*, 1978, vol. 243, no. 2, pp. 314–317. (In Russ.)

8. Ryapolov V. V. Calculation of resonant slotted waveguide antennas with longitudinal radiating slots. *Elektronnaya tekhnika, Ser. Electronica SVCH*. 1985, no. 2 (374), pp. 29–33. (In Russ.)

9. Ivanov M. A., Ryapolov V. V., Khavkina T. A. Calculation of the slotted waveguide antenna arrays. *Elektronnaya tekhnika, Ser. Electronica SVCH*. 1990, no. 10 (434), pp. 9–13. (In Russ.)

10. Koshkina T. V., Maksimov O. M. Influence of the wall thickness of the waveguide on the resonant length of narrow radiating rectangular slots. *Antenny*. 2003, no. 12, pp. 49–54. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1966> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

11. Bankov S. E. Antenna arrays with sequential feeding. Moscow, Fizmatlit, 2013, 416 p. (In Russ.)

12. Kremenetsky S. D., Los V. F., Shamanov A. N. Slotted waveguide antenna arrays. *Antenny*. 2004, no. 8–9, pp. 47–55. URL: <http://www.radiotec.ru/article/1879> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

13. Kashin A. V. Design and research methods of the slotted waveguide antenna arrays. *Antenny*. 2006, no. 3, pp. 3–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9213036> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

14. Richardson P. N., Lee H. Y. Design and Analysis of Slotted Waveguide Arrays. *Microwave J*. 1988, no. 6, pp. 109–125. doi: 10.1002/1098-2760(20001220)27:6<3.3.CO;2-J (accessed 22.03.2020)

15. Stern G., Elliott R. Resonant Length of Longitudi-

nal Slots and Validity of Circuit Representation. Theory and experiment. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1985, vol. 33, no. 11, pp. 1264–1271. doi: 10.1109/TAP.1985.1143509 (accessed 22.03.2020)

16. Coetzee J., Joubert J. W., Tan L. Frequency Performance Enhancement of Resonant Slotted Waveguide Arrays through the Use of Wideband Radiator or Subarraying. Microwave and Optical Technology Letters. 1999, vol. 22, pp. 35–39.

17. Park P. K., Pavlov I. Yu. Characterization of Dumbbell Slots in Rectangular Waveguide by Method of Moments. Proc. 1984 Antennas Applications Symp., IL, USA, Sept. 1984. Piscataway, IEEE, 1984, pp. 1–6.

18. Elliott R. S., Kurtz L. A. The Design of Small Slot Arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1978, vol. AP-26, iss. 2, pp. 214–219. doi: 10.1109/TAP.1978.1141814 (accessed 22.03.2020).

19. Elliott R. S. On the Design of Traveling-Wave-Fed Longitudinal Shunt Slot Arrays. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1979, vol. AP-27, iss. 5, pp. 717–720. doi: 10.1109/TAP.1979.1142166

20. Elliott R. S. An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1983, vol. AP-31, no. 1, pp. 48–53. doi: 10.1109/TAP.1983.1143002

21. Elliott R. S., O'Loughlin W. R. The Design of Slot Arrays including Internal Mutual Coupling. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1986, vol. AP-34, no. 9, pp. 1149–1154. doi: 10.1109/TAP.1986.1143947

22. Elliott R. S. Antenna Theory and Design. New York, John Wiley & Sons, 2003. 612 p.

23. Sekretarov S. S., Vavriv D. M. A Wideband Slotted Waveguide Antenna Array for SAR Systems // Progress in

Electromagnetics Research M. 2010, vol. 11, pp. 165–176. URL: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm11/14.10010606.pdf> (accessed 22.03.2020)

24. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and Investigation of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna. 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 26–30 June 2017. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 291–294. doi: 10.1109/RSEMW.2017.8103653

25. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design and investigation of a linear equidistant slotted waveguide antenna. Antenny. 2018, no. 2, pp. 15–20. URL: <http://www.radiotec.ru/article/20424> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

26. Semenikhin A. I., Koshkidko V. G., Klimov A. V. Dish antennas design using the Mathcad package. Tutorial. Taganrog, SFEDU Publishing House, 2016, 80 p. URL: <https://hub.lib.sfedu.ru/repository/material/800914249/> (accessed 22.03.2020) (In Russ.)

27. Johnson R. C., Jasik H. Antenna Engineering Handbook. 2nd ed. Portland, McGraw-Hill, 1993. 1408 p.

28. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Frequency Performance Analysis of a Linear Equidistant Slotted Waveguide Antenna Consisting of Subarrays. 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 24–28 June 2019. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 480–483. doi: 10.1109/RSEMW.2019.8792768

29. Koshkid'ko V. G., Migalin M. M. Design of a Slotted Waveguide Antenna by Means of VBScript Scripting Language Macros in CAD Ansys HFSS. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020; vol. 23, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-6-17 (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir G. Koshkid'ko, Cand. of Sci. (Eng.) (1988), Associate Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Radio Engineering Systems and Control Institute of Southern Federal University in Taganrog, Russia. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2008). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: electromagnetics and applied electrodynamics; electromagnetic waves scattering by impedance structures; impedance, slot and microstrip electromagnetic structures; microstrip antennas; reactive loaded antennas.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia

E-mail: kvg59@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-1119-5117>

Mikhail M. Migalin, Master of Science on Infocommunication technologies and communication systems (2020), post graduate student of the department of Antennas and radio transmitting devices of Southern Federal University in Taganrog, Russia. The author of 10 scientific papers. Area of expertise: periodic antenna structures; antenna arrays and materials' dielectric properties analysis.

Address: RESCI SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia

E-mail: migalin.mikhail@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1600-7349>