

Синтез направленного излучателя в диапазоне 0.9...5.8 ГГц**И. А. Литовский¹, Е. А. Маврычев²✉**¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603950, Россия²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
ул. Минина, д. 24, Нижний Новгород, 603950, Россия✉ mavrychev.eugene@mail.ru**Аннотация**

Введение. Рассмотрена проблема синтеза направленного излучателя с 50-омным портом на входе, в частотном диапазоне 0.9...5.8 ГГц. Данный диапазон на сегодняшний день является наиболее актуальным для анализа электромагнитной обстановки, так как в этой полосе частот наиболее часто реализуется обмен информацией с бортовой аппаратурой беспилотных летательных аппаратов.

Цель работы. Синтез направленного широкополосного излучателя в частотном диапазоне 0.9...5.8 ГГц.

Материалы и методы. Используется метод электродинамического моделирования для синтеза широкополосного излучателя. Характеристики излучателя, оптимизированные на модели, подтверждаются с помощью натуральных экспериментов на макете излучателя. Измерения диаграммы направленности, проводимые в безэховой камере, и коэффициента стоячей волны (КСВ) осуществляются с помощью анализатора цепей.

Результаты. Предложен неаналитический метод параметрической оптимизации модели по критерию $КСВ < 2$ с помощью новейших средств электродинамического моделирования. Приведены эскизы разработанной оптимизированной модели с указанием итоговых значений всех параметров. Представлены снимки расчетного распределения электрического поля по полотну антенны, расчетные диаграммы направленности на нескольких частотных точках, расчетный КСВ модели. По результатам моделирования и оптимизации изготовлен макет излучателя. Приведены измеренные главные сечения диаграммы направленности и КСВ макета.

Заключение. В результате представленного исследования разработана модель широкополосного излучателя в диапазоне 0.9...5.8 ГГц, проведено макетирование и краткий сравнительный анализ расчетных и измеренных характеристик антенны, демонстрирующий хорошее совпадение. Описаны преимущества предложенного метода и самой модели излучателя. Результаты работы актуальны в задачах наблюдения, пеленгации и приема сигналов от беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: сверхширокополосная антенна, антенна Вивальди, СВЧ-диапазон, электродинамическое моделирование

Для цитирования: Литовский И. А., Маврычев Е. А. Синтез направленного излучателя в диапазоне 0.9...5.8 ГГц // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 45–52. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-45-52

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.04.2019; принята к публикации после рецензирования 02.08.2019; опубликована онлайн 27.09.2019



Synthesis of a Radiator in the Frequency Range of 0.9...5.8 GHz

Ilya A. Litovsky¹, Evgeny A. Mavrychev²✉

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
23, Gagarin Pr., 603950, Nizhny Novgorod, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
24, Minina Str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia

✉ mavrychev.eugene@mail.ru

Abstract

Introduction. In this work, we consider the problem of a radiator synthesis with the 50-Ohm port at the input in the frequency range of 0.9...5.8 GHz. At present, this frequency range is the most relevant for the electromagnetic environment analysis due to information exchange with the on-board equipment of unmanned aerial vehicles is most often realized in this frequency range.

Objective. The main objective of this work is the synthesis of a radiator for an ultra-wideband antenna array in the frequency range of 0.9...5.8 GHz.

Materials and methods. In this work, the method of full-wave electromagnetic simulation is used for the broadband radiator synthesis. The characteristics of the radiator are optimized by simulation and confirmed by experimental investigations of the radiator model. The antenna radiation pattern measurements are carried out in the anechoic chamber and standing wave ratio (SWR) is calculated by using the network analyzer.

Results. A non-analytical method of the model parametric optimization considering the $SWR < 2$ criterion and using the latest tools of the full-wave electromagnetic simulation is proposed. The examples of the designed optimized model with the final values of all parameters are reported. The calculated distributions of the electric field over the antenna, calculated radiation patterns at several frequency points, and calculated SWR of the model are presented. The radiator model is made taking into account simulation and optimization results. The measured main cross-sections of the radiation pattern and SWR of the model are shown.

Conclusion. In the present work, the broadband radiator model in the frequency range of 0.9...5.8 GHz is designed. The machining and brief comparative analysis of the calculated and measured antenna characteristics is carried out and demonstrated a good agreement. The advantages of the proposed method and designed radiator model are described. The results of this work are relevant in the tasks of observation, direction finding and signals reception from unmanned aerial vehicles.

Key words: ultra-wideband antenna, Vivaldi antenna, microwave range, full-wave electromagnetic simulation

For citation: Litovsky I. A., Mavrychev E. A. Synthesis of a Radiator in the Frequency Range of 0.9...5.8 GHz. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 45–52. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-45-52

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 09.04.2019; accepted 02.08.2019; published online 27.09.2019

Введение. Интерес к сверхширокополосным радиотехническим системам нарастает ввиду ряда преимуществ [1, 2]. Для радиолокации это высокая разрешающая способность и возможность распознавания объектов, для систем радиосвязи – высокая пропускная способность и возможность скрытной передачи данных. Разработка элементов высокочастотного тракта для сверхширокополос-

ных систем требует специальных подходов, существенно отличающихся от традиционных решений. Такими элементами являются излучающие устройства.

Цель настоящей статьи – синтез направленного широкополосного излучателя в диапазоне 0.9...5.8 ГГц, целевым параметром которого является ширина рабочей полосы излучателя. Под ши-

риной полосы антенны в узком смысле понимают диапазон частот, внутри которого значение коэффициента стоячей волны (КСВ) излучателя не превышает 2. В диапазоне частот 0.9...5.8 ГГц, выбранном в описываемой работе, наиболее часто реализуется обмен информацией (телеметрия, управление, видео) с бортовой аппаратурой беспилотных летательных аппаратов.

В широком смысле, помимо согласования в указанной полосе, добавляется требование независимости электрических характеристик (например, направленных свойств) от рабочей частоты внутри заявленного диапазона. При этом излучатель должен быть компактным.

Существующие виды широкополосных излучателей. Классификация антенн по ширине полосы не имеет строгих критериев, однако среди специалистов часто используются следующие разграничения по параметру частоты (ν) [3]:

$$2 \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{\nu_{\max} + \nu_{\min}} < 0.1$$

– узкополосный излучатель резонансного типа;

$$2 \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{\nu_{\max} + \nu_{\min}} < 0.15$$

– широкополосный излучатель;

$$\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\min}} \geq 5$$

– сверхширокополосный (СШП) или частотно-независимый излучатель.

Для расширения рабочей полосы часто используют дополнительное симметрирующее устройство в узле питания [4–6]. Однако такие меры не позволяют существенно увеличить полосу, но вносят ограничения на максимальную мощность сигнала, минимальные характерные размеры излучателя, минимальные потери на прием и передачу сигнала и т. д. Поэтому при разработке СШП-антенны целесообразно отказаться от доработки узкополосных излучателей в пользу принципиально сверхширокополосных геометрий.

К настоящему времени известны несколько видов СШП-антенн: спиральные, фрактальные, логопериодические, а также антенны Вивальди.

Фрактальные излучатели действительно имеют много рабочих частотных диапазонов, однако между ними находятся продолжительные частот-

ные диапазоны рассогласования. Примерами успешных фрактальных СШП-антенн являются исследованные ранее частные случаи, конструкция которых базируется на участке самоподобной геометрической фигуры (например, спирали, логопериодические антенны). Фрактальные формы в применении к синтезу излучателей на настоящий момент исследованы не вполне [7, 8]. От антенн логопериодического типа необходимо отказаться ввиду неприменимости объемных геометрий в диапазоне 0.9...5.8 ГГц. Печатные логопериодические антенны в силу особенности подведения фидерного тракта должны быть исполнены с помощью трехслойной платы. Это существенно усложняет технологический процесс, а сами излучатели мало исследованы для столь высокочастотных диапазонов. По схожим причинам необходимо отказаться и от спиральных антенн [9].

Антенны Вивальди – обобщенное название класса антенн, отличающихся СШП-свойствами. Само название излучателей является популярным названием и не имеет под собой аргументации, однако, по научной классификации, это класс печатных щелевых антенн бегущей волны (ПЩАБВ), излучающей частью в которых является щель, вытравленная в металлизации полотна антенны. Первое упоминание о ПЩАБВ датировано 1979 г. в экспериментальной работе Гибсона [10]. В дальнейшем были разработаны и исследованы различные методы получения характеристик излучения аналитических электродинамических моделей антенн. Так появились экспоненциальные профили щели, профили Ферми–Дирака и т. д. [11–13].

Модель СШП-излучателя. К настоящему моменту не существует единого простого метода синтеза СШП ПЩАБВ. В [3, 14] разработан и рассмотрен аналитический метод синтеза ПЩАБВ. Метод базируется на выборе мультипликативного критерия и дальнейшем поиске удовлетворяющих его геометрий. Такие методы не учитывают распределение полей в узлах питания, но имеют достаточную точность описания полей на профиле и полотне антенны. Аналитический подход связан с интегрированием требуемых выходных характеристик как функций геометрии полотна антенны [15]. Таким образом, аналитическая задача синтеза ПЩАБВ сводится к аппроксимации зависимостей требуемых выходных характеристик и дальнейшему перебору геометрий полотна с учетом всех допущенных приближений. Такой метод расчета крайне сложен для применения на практике и в производстве.

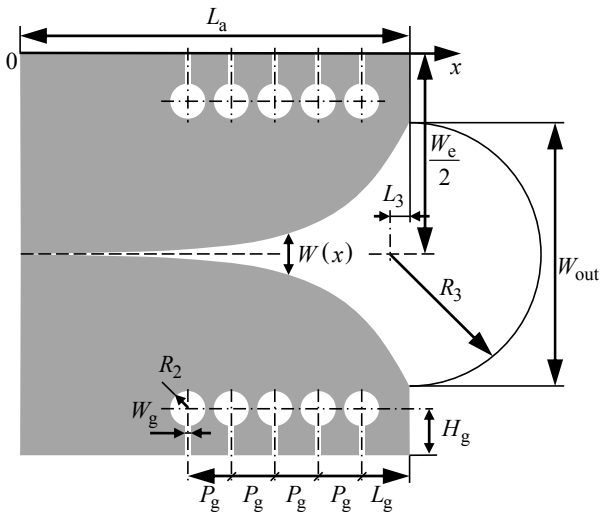


Рис. 1. Схема излучающей части ПЩАБВ

Fig. 1. Scheme of the radiating part of the printed traveling-wave slot antenna

В некотором смысле менее сложным является метод синтеза ПЩАБВ с помощью новейших средств электродинамического моделирования (CST studio, HFSS, FEKO и др.). Данный метод также базируется на параметрической оптимизации геометрии, однако не требует аналитической аппроксимации выходных характеристик, так как геометрия антенны анализируется методом конечных элементов [16].

Метод параметрической оптимизации широко распространен в настоящее время [17]. Решение задачи синтеза антенны Вивальди начинается с выбора оптимальной и достаточно общей структуры модели излучателя.

Для описанного решения структура исходной модели ПЩАБВ взята из [14], в которой были по-

дробно исследованы некоторые частные случаи ПЩАБВ в более высокочастотных диапазонах. Модель излучающей части антенны (рис. 1) имеет экспоненциальный профиль щели $W(x)$. Прямоугольный профиль подложки дополнен фазокорректирующей линзой в виде кругового сектора радиусом R_3 . Для уменьшения уровня бокового излучения на нижних частотах на боковых гранях излучающей части модели вытравлены колебательные контуры в форме канавок с параметрами R_2 , W_g , расположенных на расстоянии H_g от края полотна антенны. Форма и количество контуров варьируются и окончательно выбираются в соответствии с оптимальной формой диаграммы направленности (ДН) на нижних частотах при условии отсутствия недопустимых резонансных эффектов, затягивающих или модулирующих сигнал при работе антенны в импульсном режиме [14]. ДН на верхних частотах при этом практически не изменяется.

В качестве линии питания ПЩАБВ выбран микрополосково-щелевой переход (рис. 2) [3], который может быть реализован на печатной плате, общей с ПЩАБВ. Металлизация линии питания наносится с обратной по отношению к полотну излучателя стороны диэлектрической подложки.

Участок длины L_{tr} (рис. 2) является повышающим трансформатором между 50-омной линией и емкостью кругового сектора радиусом R_5 .

Линия питания и излучающая часть моделировались и оптимизировались отдельно. Варьируемыми параметрами в моделях (рис. 1, 2) являлись: W_e , L_a , W_{in} , W_{out} , R_1 , R_2 , R_3 , L_3 , L_g ,

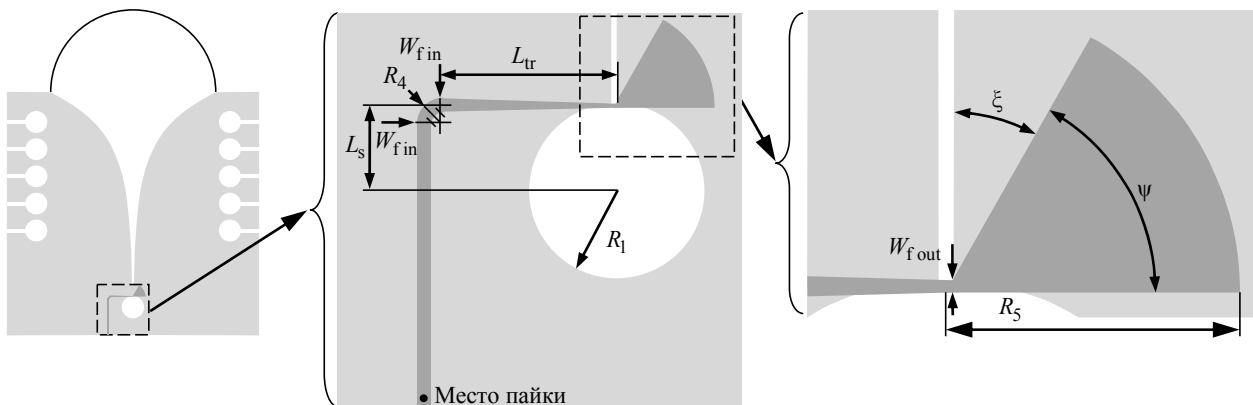


Рис. 2. Узел питания ПЩАБВ

Fig. 2. Power node of the printed traveling-wave slot antenna

ORIGINAL ARTICLE

Электродинамика, микроволновая техника, антенны
Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

P_g , W_g – излучающей части (рис. 1); R_4 , R_5 , W_{fin} , W_{fout} , L_{tr} , L_s , а также угол раскрыва ψ и ориентация кругового сектора ξ – в линии питания (рис. 2). В качестве начальных значений габаритов антенны W_e , L_a были выбраны наибольшие полудлина и длина волны в диапазоне рабочих частот соответственно. Величина W_{out} выбрана равной ширине полотна. Начальное значение ширины щели W_{in} принято равным ширине 50-омной несимметричной микрополосковой линии для использованного диэлектрика (материал марки Rogers RO4003С, толщиной 0.508 мм).

Параметрическая оптимизация модели ПЩАБВ осуществлялась в несколько итераций электродинамическим моделированием методом конечных элементов. Для поиска оптимальных значений параметров в заданных интервалах рассчитывались выходные характеристики при всех возможных вариациях параметров модели. Набор параметров, при котором площадь под графиком КСВ в рабочем диапазоне была минимальной, являлся оптимальным набором в текущей итерации. Изменение интервала вариации каждого из параметров прекращалось, как только текущее оптимальное значение параметра оказывалось внутри интервала, но не на его границе. Дальнейшая оптимизация по параметру осуществлялась методом половинного деления интервала до тех пор, пока удовлетворительные изменения КСВ оставались существенными.

Результаты. В результате оптимизации модели по критерию КСВ < 2 во всем диапазоне при условии минимальной зависимости направленных свойств от частоты получены следующие значения параметров:

$$W_e = 252 \text{ мм}, L_a = 245 \text{ мм}, W_{in} = 0.35 \text{ мм},$$

$$W_{out} = 167 \text{ мм}, R_1 = 7 \text{ мм}, R_2 = 11 \text{ мм},$$

$$R_3 = 84 \text{ мм}, R_4 = 1.2 \text{ мм}, R_5 = 7.8 \text{ мм},$$

$$L_3 = 8 \text{ мм}, L_g = 29.5 \text{ мм}, P_g = 27 \text{ мм},$$

$$W_g = 3 \text{ мм}, W_{fin} = 3 \text{ мм}, W_{fout} = 0.35 \text{ мм},$$

$$L_{tr} = 13.9 \text{ мм}, L_s = 6.8 \text{ мм}.$$

Полученные в результате моделирования распределения поля по апертуре антенны для средней частоты диапазона в два момента времени представлены на рис. 3. Расчетные характеристики антенны после оптимизации приведены в таблице.

По результатам моделирования и оптимизации изготовлен макет ПЩАБВ (рис. 4).

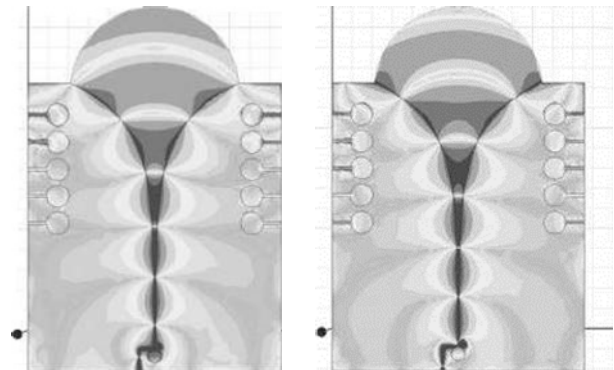


Рис. 3. Распределение поля по апертуре антенны на частоте 2.4 ГГц для двух моментов времени (результат моделирования)

Fig. 3. Field distribution over the antenna aperture at a frequency of 2.4 GHz for two time moments (simulation)

Расчетные характеристики антенны после оптимизации
Antenna calculated characteristics after optimization

Частота, ГГц/ Frequency, GHz	Максимальный коэффициент усиления, дБ/ Maximum gain, dB	Ширина ДН, ...°/ Radiation pattern width, ...°	
		Е-плоскость/ E-plane	Н-плоскость/ H-plane
0.9	8.4	60	114
2.4	9.0	66	44
5.8	10.9	72	32

Результаты измерения характеристик направленности макета в безэховой камере представлены на рис. 5 вместе с расчетными значениями нормированных ДН (НДН) D . По результатам измерений НДН вычислены значения коэффициента усиления антенны на граничных частотах диапазона: 9.8 дБ на частоте 0.9 ГГц и 13.9 дБ на частоте 5.8 ГГц.

Результаты расчета КСВ антенны и его измерения на макете представлены на рис. 6. Эти результаты полностью удовлетворяют критерию оптимизации.

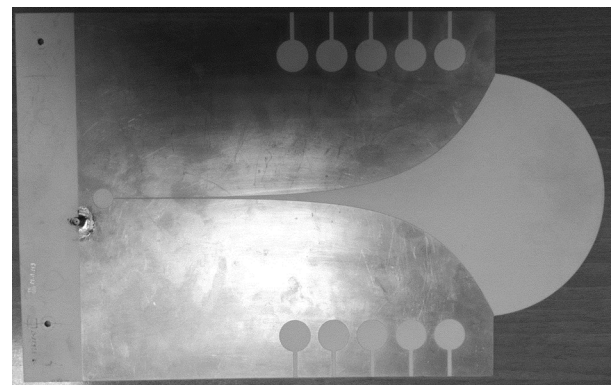


Рис. 4. Макет ПЩАБВ

Fig. 4. Model of the printed traveling-wave slot antenna

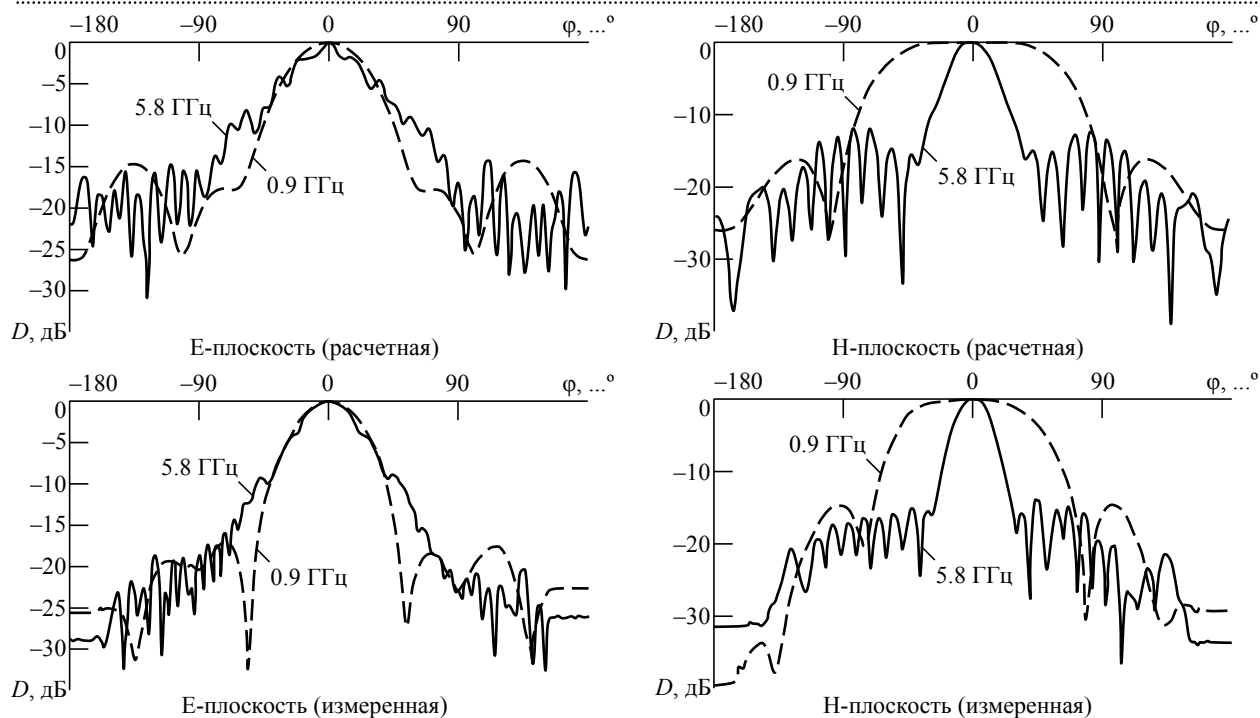


Рис. 5. Экспериментальные нормированные диаграммы направленности макета излучателя на граничных частотах диапазона

Fig. 5. Experimental normalized radiation patterns of the radiator model at the cutoff frequencies

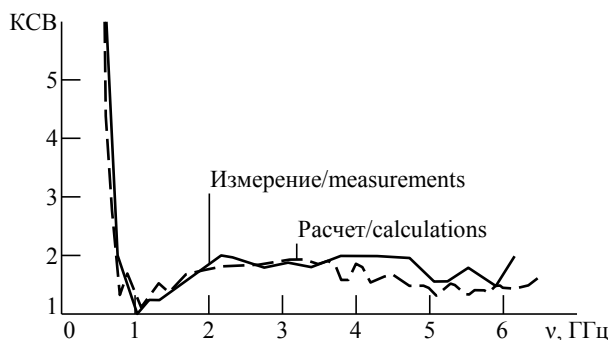


Рис. 6. Характеристики согласования антенны

Fig. 6. Antenna matching characteristics

Обсуждение. В электродинамической модели к микрополосково-щелевому переходу подведена идеальная 50-омная линия питания. Макет отличается от модели наличием в этом месте разъема СРГ-50-751ФВ, вносящего собственное рассогласование, что обуславливает незначительное расхождение кривых КСВ в области высоких частот.

Как видно из рис. 3, диэлектрическая линза практически не влияет на форму фазового фронта. Это вызвано тем, что параметры модели оптимизировались по критерию $КСВ < 2$ без дополнительных ограничений. Таким образом, для уменьшения размеров антенны при прочих равных характеристиках от линзы можно отказаться.

Для оптимизации формы фазового фронта следует оптимизировать параметры линзы отдельно, так как ее форма слабо влияет на согласование антенны. Также на рис. 3 видны узлы и пучности волны распространяющейся по полотну антенны, что косвенно свидетельствует о согласованности излучателя на средней частоте диапазона.

Максимальная разница между коэффициентами направленного действия и усиления антенны (см. таблицу) в рабочем диапазоне наблюдается на частоте 5.8 ГГц. Таким образом, минимальный коэффициент полезного действия (КПД) разработанной антенны составляет $10.9 - 13.9 = -3$ дБ или около 50 %, что является сравнительно высоким значением КПД для печатной антенны с характерным размером полотна 1–6 длин волн, в зависимости от выбранной частоты.

Как видно из рис. 5, антенна сохраняет направленность излучения в рабочем диапазоне. Ширина главного лепестка в Н-плоскости уменьшается с ростом частоты; ширина лепестка в Е-плоскости от частоты не зависит. Расчетные ДН несколько шире измеренных, что вызвано различиями электродинамической модели и реального макета (наличие разъема в линии питания, неидеально плоский фронт падающего излучения в безэховой камере).

Измерения, проведенные на макете разработанной ПЩАБВ, показали сходство с результатами применения неаналитического метода синтеза СШП-излучателя на базе принятой структурной модели. Предложенный метод удобен для практи-

ческого применения в инженерных разработках и достоверен для данной структурной модели СШП-излучателя. Антенна обладает низкой стоимостью и легко повторяема.

Список литературы

1. Yang L., Giannakis G. B. Ultra-Wideband Communications. An Idea whose Time has Come // IEEE Signal Processing Magazine. 2004. Vol. 21, № 6. P. 26–54. doi: 10.1109/MSP.2004.1359140
2. Localization via Ultra-Wideband Radios / S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. V. Molisch, H. V. Poor, Z. Sahinoglu // IEEE Signal Processing Magazine. 2005. Vol. 22, № 4. P. 70–84. doi: 10.1109/MSP.2005.1458289
3. Чернышев С. Л. Приближенный аналитический синтез сверхширокополосных устройств на плавных нерегулярных линиях // Наука и образование. Электрон. журн. 2008. № 1. URL: <http://engineering-science.ru/doc/70017.html> (дата обращения: 09.04.2019)
4. Ultrawideband VHF/UHF Dipole Array Antenna / A. J. Fenn, P. T. Hurst, J. D. Krieger, J. S. Sandora, L. I. Parad // Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 12–15 Oct. 2010. Piscataway: IEEE, 2010. P. 79–82. doi: 10.1109/array.2010.5613390
5. Yang K.-W., Zhang F.-S., Li C. Design of a Novel Wideband Printed Dipole Array Antenna // Proc. of 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. (CSQRWC), Xuzhou, China, 21–24 July 2018. Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/csqrcw.2018.8455804
6. Terentyeva P. V., Golovkov G. A., Borovikov S. G. Antenna Array for the Passive Radar Monitoring System // Proc. of 2018 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Poznan, Poland, 14–17 May 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 208–211. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405179
7. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.
8. Исследование возможности использования принципа фрактальности для построения многодиапазонных сверхширокополосных антенных структур на основе ТЕМ-рупоров, размещенных внутри друг друга / А. В. Ашихмин, Ю. Г. Пастернак, И. В. Попов, Ю. А. Рембовский // Антенны. 2008. № 2 (129). С. 32–38.
9. Ротхаммель К. Антенны: в 2 т. Т. 2. М.: ДМК-Пресс, 2011. 414 с.
10. Gibson P. J. The Vivaldi aerial // 9th European Microwave Conf. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. Piscataway: IEEE, 1979. P. 101–105. doi: 10.1109/EUMA.1979.332681
11. A UHF Ultrabroadband Vivaldi-Type Direction Finding Antenna / R. Mueller, S. Lutz, R. Lorch, T. A. Walter // Proc. of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Toronto, ON, Canada, 11–17 July 2010. Piscataway: IEEE, 2010. doi: 10.1109/aps.2010.5561691
12. A Design of High-Gain Vivaldi Antenna Loaded with Antipodal Structure and Slotting Correction / Y. Tang, X. Cao, Y. Song, L. Jidi, J. Lan, H. Yu // Proc. of 2018 IEEE MTT-S Intern. Wireless Symp. (IWS), Chengdu, China, 6–10 May 2018. Piscataway: IEEE, 2018. doi: 10.1109/ieee-iws.2018.8400909
13. A Miniaturized Vivaldi Antenna with High Gain for Ultra-Wideband Applications / H. Wang, S. He, Z. Ding, J. Cao, Y. Yang // Proc. of 2017 Sixth Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China, 16–19 Oct. 2017. Piscataway: IEEE, 2017. doi: 10.1109/apcap.2017.8420722
14. Виленский А. Р. Чернышев С. Л. Синтез сверхширокополосных излучателей экспоненциального типа // XV МНТК "Радиолокация, навигация, связь". Воронеж, 14–16 апр. 2009. Т. 1. С. 396–405.
15. Рязанов И. Г., Бякин А. А., Белоусов О. А. Анализ и синтез широкополосной планарной щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели для систем широкополосного доступа // Вопр. соврем. науки и практики. 2013. № 2 (46). С. 297–306.
16. Математические методы прикладной электродинамики / под ред. С. Б. Раевского. М.: Радиотехника, 2007. 88 с.
17. Shan J., Xu A., Lin J. A Parametric Study of Microstrip-Fed Vivaldi Antenna // Proc. of 2017 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 13–16 Dec. 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1099–1103. doi: 10.1109/comppcomm.2017.8322713

Информация об авторах

Литовский Илья Александрович – инженер-электроник ПАО «НПО "Алмаз"». Окончил аспирантуру нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского по кафедре "Бионика и статистическая радиофизика". Автор 3 научных публикаций. Сфера научных интересов – антенные системы СВЧ. E-mail: litolvskii@list.ru

Маврычев Евгений Александрович – кандидат технических наук (2003), доцент (2012) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексея. Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая обработка сигналов и ее применение в радиосвязи и радиолокации; теория обнаружения и оценивания; адаптивная обработка сигналов; обработка данных в сетях; машинное обучение.

E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>

References

1. Yang L., Giannakis G. B. Ultra-Wideband Communications: An Idea whose Time has Come. IEEE Signal Processing Magazine. 2004, vol. 21, no. 6, pp. 26–54. doi: 10.1109/MSP.2004.1359140
2. Gezici S., Tian Z., Giannakis G. B., Kobayashi H., Molisch A. V., Poor H. V., Sahinoglu Z. Localization via Ultra-Wideband Radios. IEEE Signal Processing Magazine. 2005, vol. 22, no. 4, pp. 70–84. doi: 10.1109/MSP.2005.1458289
3. Chernyshev S. L. Approximate analytical synthesis of ultra-wideband devices on smooth irregular lines. Science and education. MGTU N. E. Bauman. Electron. Journal. 2008, no. 1. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/70017.html> (accessed 09.04.2019) (In Russ.)
4. Fenn A. J., Hurst P. T., Krieger J. D., Sandora J. S., Parad L. I. Ultrawideband VHF/UHF Dipole Array Antenna. Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 12–15 Oct. 2010. Piscataway, IEEE, 2010, pp. 79–82. doi: 10.1109/array.2010.5613390
5. Yang K.-W., Zhang F.-S., Li C. Design of a Novel Wideband Printed Dipole Array Antenna. Proc. of 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. (CSQRWC), Xuzhou, China, 21–24 July 2018. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/csqrwc.2018.8455804
6. Terentyeva P. V., Golovkov G. A., Borovikov S. G. Antenna Array for the Passive Radar Monitoring System. Proc. of 2018 22nd Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Poznan, Poland, 14–17 May 2018. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 208–211. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405179
7. Theoretical foundations of radar. Ed. by J. D. Shirman. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p. (In Russ.)
8. Ashihmin A. V., Pasternak Y., Popov I. V., Rembovsky Y. A. Investigation of the possibility of using the principle of fractality to build multi-band ultra-wideband antenna structures based on TEM horns placed inside each other. Antennas. 2008, № 2(129), pp. 32–38.
9. Rothammel K. Antennas, vol. 2. Moscow, DMK-Press, 2011, 414 p. (In Russ.)
10. Gibson P. J. The Vivaldi aerial. 9th European Microwave Conference. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. Piscataway, IEEE, 1979, pp. 101–105. doi: 10.1109/EUMA.1979.332681
11. Mueller R., Lutz S., Lorch R., Walter T. A. UHF Ultrabroadband Vivaldi-Type Direction Finding Antenna. Proc. of 2010 IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp., Toronto, ON, Canada, 11–17 July 2010. Piscataway, IEEE, 2010. doi: 10.1109/aps.2010.5561691
12. Tang Y., Cao X., Song Y., Jidi L., Lan J., Yu H. A Design of High-Gain Vivaldi Antenna Loaded with Antipodal Structure and Slotting Correction. Proc. of 2018 IEEE MTT-S Intern. Wireless Symp. (IWS), Chengdu, China, 6–10 May 2018. Piscataway, IEEE, 2018. doi: 10.1109/ieee-iws.2018.8400909
13. Wang H., He S., Ding Z., Cao J., Yang Y. A Miniaturized Vivaldi Antenna with High Gain for Ultra-Wideband Applications. Proc. of 2017 Sixth Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), Xi'an, China, 16–19 Oct. 2017. Piscataway, IEEE, 2017. doi: 10.1109/apcap.2017.8420722
14. Vilensky A. R., Chernyshev S. L. Synthesis of ultra-wideband radiators of exponential type. XV ISTC Radio-location, navigation, connection. Voronezh, 2009, vol. 1, pp. 396–405. (In Russ.)
15. Ryazanov I. G., Byakin A. A., Belousov O. A. Analysis and Synthesis of Broadband Planar Slit Antenna with Slit Width Exponential Change For Broadband Access Systems. Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. 2013, no. 2 (46), pp. 297–306. (In Russ.)
16. Mathematical methods of applied electrodynamics. Ed. by S. B. Raevsky. Moscow, Radio engineering, 2007, 88 p. (In Russ.)
17. Shan J., Xu A., Lin J. A Parametric Study of Microstrip Fed Vivaldi Antenna. Proc. of 2017 3rd IEEE Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 13–16 Dec. 2017. Piscataway, IEEE, 2017, pp. 1099–1103. doi: 10.1109/compcomm.2017.8322713

Information about the authors

Ilya A. Litovsky – Postgraduate student of the Department of Bionics and Statistical Radiophysics of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod. Electronic Engineer at PJSC «NPO "Almaz"». The author of 3 scientific publications. Area of expertise: microwave antenna systems.
E-mail: litovskii@list.ru

Evgeny A. Mavrychev – Cand. Sci. (Engineering) (2003), Associate Professor (2012) on the Department of Information Radio Systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. Ye. Alekseev. The author of more than 70 scientific papers. Area of expertise: statistical signal processing and its application in communications and radar; detection and estimation theory; adaptive signal processing; data processing in networks; machine learning.
E-mail: mavrychev.eugene@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5707-0806>