

Исследование характеристик элемента плоской антенной решетки Вивальди с расширенной полосой рабочих частот

И. Н. Бобков[✉], Ю. В. Юханов

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

[✉] antennadesign@outlook.com

Аннотация

Введение. Основным механизмом расширения полосы рабочих частот в антенных решетках Вивальди является удлинение излучателей. Однако вслед за длиной излучателей увеличивается масса всего изделия и стремительно растет уровень кросс-поляризации. Исследования последних лет в этой области в основном были сфокусированы на техниках снижения уровня кросс-поляризационного излучения. Однако малоизученной остается возможность разработки антенных решеток Вивальди с расширенной рабочей полосой частот в первую очередь без изменения габаритных размеров излучателей или шага антенной решетки.

Цель работы. Разработка конструкции и исследование характеристик излучателя антенной решетки Вивальди, обеспечивающего работу в более широкой рабочей полосе частот, не прибегая к увеличению габаритов и массы.

Материалы и методы. Численное исследование характеристик элементарной ячейки с периодическими граничными условиями на гранях выполнено в программе ANSYS HFSS. Проведен сравнительный анализ характеристик элементарных ячеек антенной решетки-прототипа и предлагаемой конструкции.

Результаты. Представлены результаты проектирования излучателя антенной решетки Вивальди с улучшенными характеристиками. Исследовано влияние отдельных параметров излучателя на его характеристики при работе в составе бесконечной антенной решетки. Проведен сравнительный анализ характеристик элементарных ячеек двух плоских бесконечных антенных решеток линейной поляризации: на основе предложенного излучателя и излучателя-прототипа. Показана возможность понижения нижней границы рабочей полосы частот на 18.6 % и снижения уровня кросс-поляризации на отдельных частотах до 15 дБ.

Заключение. Предложенная конструкция излучателя позволяет расширить рабочую полосу частот антенной решетки, не прибегая к увеличению габаритных размеров. Проведенное численное исследование позволило определить ориентиры, которых следует придерживаться при разработке антенных решеток на основе предлагаемого решения.

Ключевые слова: антенные решетки, антенны Вивальди, расширение полосы частот, элементарная ячейка

Для цитирования: Бобков И. Н., Юханов Ю. В. Исследование характеристик элемента плоской антенной решетки Вивальди с расширенной полосой рабочих частот // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-48-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> в Центре коллективного пользования "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета (Таганрог, Россия).

Статья поступила в редакцию 04.11.2023; принята к публикации после рецензирования 10.01.2024; опубликована онлайн 29.02.2024

Characteristics of the Radiating Element of a Planar Vivaldi Antenna Array with Improved Bandwidth

Ivan N. Bobkov✉, Yury V. Yukhanov

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ antennadesign@outlook.com

Abstract

Introduction. The conventional approach to extending the operating frequency band of Vivaldi antenna arrays consists in increasing the radiating element length. However, this inevitably leads to an increase in the mass of the entire array, and, therefore, to a rapid growth in the cross-polarization level. Recent studies in this field have mainly focused on techniques for reducing the cross-polarization level. At the same time, the possibility of developing Vivaldi antenna arrays with an extended operating frequency band, primarily without changing the overall dimensions of the elements or the antenna array pitch, remains insufficiently studied.

Aim. Design and study of the Vivaldi antenna radiating element that ensures operation of the array in a wider operating frequency band without increasing its overall dimensions and weight.

Materials and methods. A numerical study of the characteristics of a unit-cell with periodic boundary conditions on the side faces was carried out in the ANSYS HFSS software. A comparative analysis of the unit-cell characteristics of the prototype antenna array and the proposed design was carried out.

Results. The design of the Vivaldi antenna radiating element is presented. The influence of some geometric parameters on the characteristics of the antenna array is studied. A comparative analysis of the unit-cell characteristics of two infinite single-polarization antenna arrays based on a regular Vivaldi element and the proposed solution is carried out. The possibility of improving the antenna array bandwidth by 18.6 % and improving cross-polarization by 15 dB on certain frequencies without increasing the overall dimensions or the antenna array pitch is shown.

Conclusion. The proposed Vivaldi antenna design makes it possible to extend its operating frequency band without increasing the overall dimensions. The results of the conducted numerical study should be used when developing antenna arrays based on the proposed solution.

Keywords: antenna arrays, Vivaldi antenna, bandwidth extension, unit-cell

For citation: Bobkov I. N., Yukhanov Yu. V. Characteristics of the Radiating Element of a Planar Vivaldi Antenna Array with Improved Bandwidth. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-48-56

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

Source of funding. This research was financially supported by Russian Science Foundation, project №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> and was performed at the Center of Collective Use "Applied Electrodynamics and antenna measurements", Southern Federal University, Taganrog, Russia.

Submitted 04.11.2023; accepted 10.01.2024; published online 29.02.2024

Введение. В настоящее время антенные решетки (АР) Вивальди [1] относятся к одному из наиболее востребованных типов сверхширокополосных систем излучателей. От других известных решений, таких как АР сильно связанных диполей [2–6] или АР излучателей "banyan tree" [7], их отличает более широкая рабочая полоса частот [8, 9]. Еще более широкополосные решения, например АР спиральных или синусных излучателей, не допускают работу на линейной поляризации и сохраняют

сверхширокополосные свойства лишь в малом секторе углов сканирования [10]. Кроме того, антенны Вивальди обладают высокой технологичностью, поскольку могут быть изготовлены из фольгированных диэлектриков по технологии и методам производства печатных плат, а возможность простого подключения 50 Ом питающей коаксиальной линии обеспечена самой конструкцией излучателя [11–14].

Однако сверхширокая рабочая полоса частот в АР Вивальди обеспечивается в первую оче-

редь длиной излучателей [9, 15]. Помимо явного увеличения габаритных размеров и массы АР, удлинение излучателей приводит к повышению уровня кросс-поляризации при сканировании луча вне основных плоскостей [16–18].

Для борьбы с этим явлением были разработаны улучшенные конструкции излучателей на основе антенны Вивальди и предложены способы понижения уровня кросс-поляризации в уже известных АР.

Так, в [8, 15, 19, 20] исследованы АР из излучателей Вивальди, в которых металлические части экспоненциально расширяющихся щелевых раскрытов "рассекались" в горизонтальных плоскостях на отдельные сегменты. Такая техника позволила контролировать влияние продольно протекающих токов [15] и понизить уровень кросс-поляризации более чем на 20 дБ [8, 15].

В [21] описан способ снижения уровня кросс-поляризации в плоских АР Вивальди линейной поляризации, суть которого заключается в добавлении металлических стенок ортогонально рядам излучателей. В [22] металлические стенки заменены на отдельные перфорированные карты, что в конечном счете позволило понизить уровень кросс-поляризации не менее чем на 25 дБ.

Описанные техники позволяют эффективно бороться со следствием удлинения излучателей, однако малоизученной остается возможность разработки АР Вивальди с расширенной рабочей полосой частот в первую очередь без изменения габаритных размеров или шага АР.

В [23] авторами настоящей статьи предложен способ расширения полосы частот АР Вивальди без увеличения продольных размеров. Он заключается в увеличении длины плавного перехода от входа антенны к щелевому раскрытию [24].

Целью данной статьи является исследование влияния формы перехода к щелевому раскрытию в излучателях Вивальди на характеристики АР.

Конструкция излучателя. Конструкция классической антиподальной антенны Вивальди [11] приведена на рис. 1, *a* (все части показаны полупрозрачными для ясности). Физически антенна представляет собой диэлектрическую подложку с двусторонней металлизацией, который располагается на фронтальной

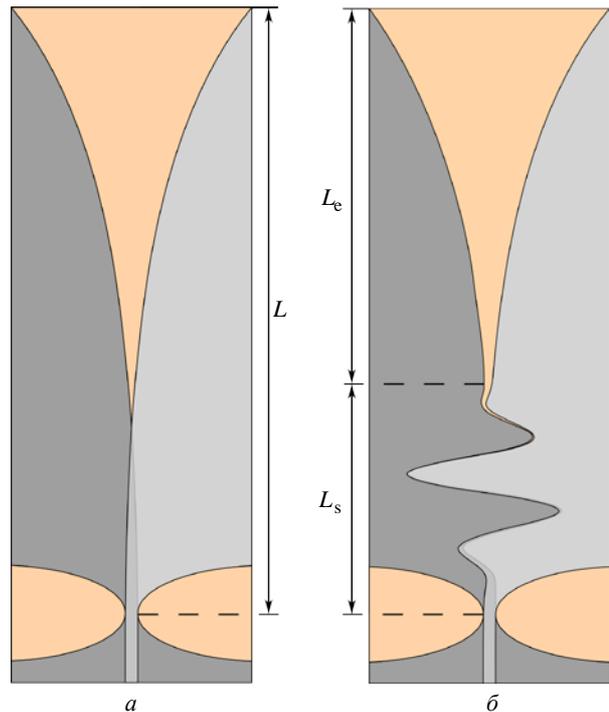


Рис. 1. Антиподальные антенны Вивальди:
a – классическая конструкция [11];
б – конструкция с переходом в форме синусоиды

Fig. 1. Antipodal Vivaldi antennas:
a – conventional design [11];
б – design with a sine-shaped transition

поверхности диэлектрической подложки. Слой металлизации на оборотной поверхности окрашен темно-серым цветом.

Вход излучателя (рис. 1, *a*) представляет собой короткий отрезок микрополосковой линии, за которым следует симметрирующая конструкция, образованная сужающимся земляным полигоном на задней поверхности подложки. На участке длиной L следует плавный переход от несимметричной щелевой линии передачи с перекрытием к несимметричной щелевой линии без перекрытия, которая, расширяясь, образует щелевой раскрыт.

Профиль расширяющегося щелевого раскрытия и перехода к нему на участке L рассчитывается по формуле

$$y(x) = a(e^{bx} - 1), \quad (1)$$

где y – индекс половинного деления; x – параметр длины; a – параметр масштабирования функции; b – показатель крутизны раскрытия [1].

На рис. 1, *б* изображена предлагаемая конструкция излучателя Вивальди. В антенне от-

резок L разделен на две части: переход от несимметричной щелевой линии с перекрытием к расширяющейся щели L_s и самой расширяющейся щели L_e . На участке L_e форма расширяющейся щели определяется выражением (1), а форма перехода на участке L_s рассчитывается по формуле

$$y(x) = a(e^{bx} - 1) \left[1 + A_m \sin(\pi x k / L_s) \sin^3(\pi x / L_s) \right],$$

где A_m – коэффициент, определяющий амплитуду синусоиды; k – количество полупериодов синусоиды; L_s – длина перехода синусоидальной формы.

Таким образом, переход на участке L_s (рис. 1, б) удлинен за счет придания ему формы синусоиды с количеством полупериодов $k = 6$.

Рассмотрим, что дает такое удлинение пути к апертуре антенны, который проходит волна при работе излучателя в составе АР.

Материалы и методы. Для проведения численного исследования характеристик предлагаемой конструкции излучателя в программном обеспечении ANSYS HFSS была разработана электродинамическая модель элемента плоской АР линейной поляризации.

Применялась техника расчета, основанная на анализе элементарной ячейки с периодическими граничными условиями на гранях [25]. При таких расчетах АР подразумевается бесконечной, а эффекты конкатенации (ухудшение согласования на входе элементов, расположенных вблизи краев АР) отсутствуют. Получаемые результаты отражают характеристики, которых можно достичь в центральных элементах электрически больших АР [4].

Общий вид элементарной ячейки АР-прототипа представлен на рис. 2, а. Излучатель выполнен из материала с $\epsilon_r = 3.5$; $\text{tg } \delta = 0.0027$ толщиной 0.508 мм. Питание осуществляется при помощи соединителя типа IX через отверстие в металлическом основании.

Слева и справа по всей длине излучателя находятся ряды металлизированных отверстий, соединяющих слои металлизации на фронтальной оборотной стороне подложки. Таким образом между соседними излучателями АР обеспечивается гальванический контакт. Если не

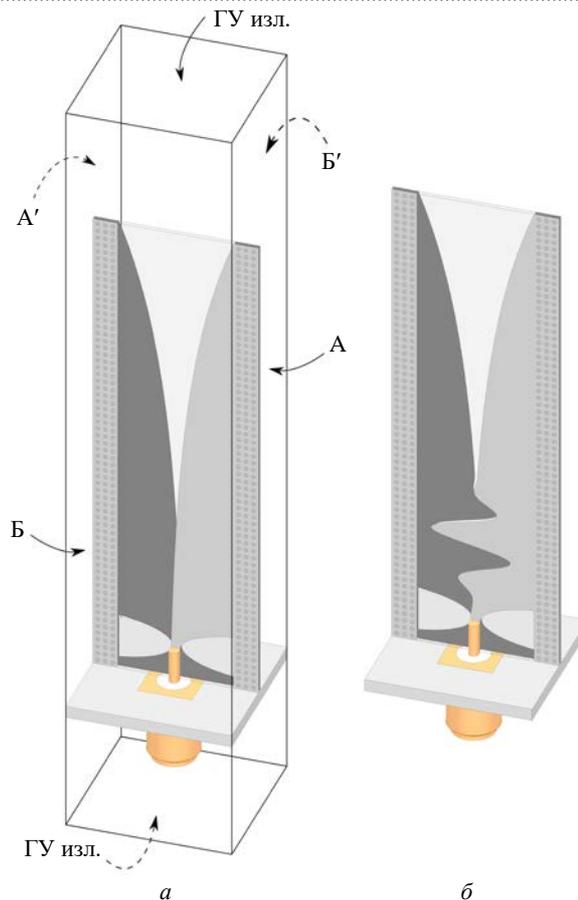


Рис. 2. Элементарные ячейки плоских однополяризационных антенных решеток Вивальди: а – прототип; б – предлагаемое решение

Fig. 2. Planar single-polarization Vivaldi antenna array unit-cells: a – prototype; б – proposed design

соединять излучатели, то промежутки между ними возбуждаются и в рабочей полосе частот появляется множество резонансных явлений, катастрофически сказывающихся на широкополосных свойствах АР [26].

Периодические граничные условия (ГУ) (рис. 2, а) заданы на поверхностях А, А' и Б, Б'. На верхней и нижней поверхностях элементарной ячейки заданы ГУ излучения.

На рис. 2, б показана предлагаемая конструкция элемента АР Вивальди с синусоидальным переходом к раскрытию (ГУ не показаны, их тип и расположение не отличаются от рис. 2, а).

Ширина и глубина обеих элементарных ячеек на рис. 2 равна шагу АР и составляет 20 мм. Высота элементов над поверхностью металлического основания 60 мм.

Результаты численного исследования. На рис. 3 приведены зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН)

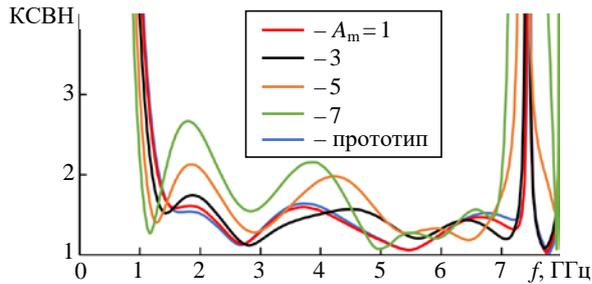


Рис. 3. Зависимости КСВН от частоты при различных значениях амплитуды синусоиды в сравнении с КСВН на входе излучателя АР-прототипа

Fig. 3. Dependence of VSWR on frequency at various amplitudes of the sinusoid in comparison with VSWR at the input of the prototype unit-cell

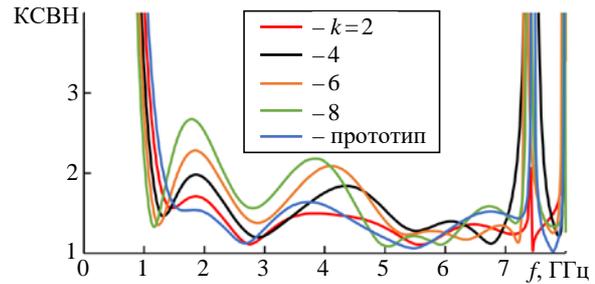


Рис. 4. Зависимости КСВН от частоты при различных значениях полупериодов синусоиды в сравнении с КСВН на входе излучателя АР-прототипа

Fig. 4. Dependence of VSWR on frequency for a various number of sinusoid half-cycles in comparison with VSWR at the input of the prototype unit-cell

от частоты при различных значениях амплитуды синусоидального перехода. Количество полупериодов принято $k = 5$, длина перехода $L_s = 18$ мм. Верхняя граница рабочего диапазона частот в АР обнаруживается около частоты 7.5 ГГц, т. е. частоты, выше которой шаг АР начинает превышать половину длины волны и появляются побочные главные максимумы диаграмм направленности [4]. Нижняя же граница диапазона, определяемого по уровню $КСВН \leq 3$, фиксируется на частоте 1149 МГц для АР-прототипа и на частотах 1072, 998, 937 МГц для коэффициента A_m , равного 3, 5, 7 соответственно.

Таким образом, с увеличением амплитуды синусоиды в переходе к щелевому раскрытию происходит смещение нижней границы и расширение полосы частот. Однако необходимо контролировать уровень согласования на остальных частотах.

Так, возможно ухудшение согласования вблизи верхней границы рабочего диапазона при больших значениях A_m . Причиной этого является большая кривизна линии передачи в месте, где оканчивается синусоидальный переход и начинается щелевой раскрытив.

Ухудшение согласования внутри рабочего диапазона частот при больших значениях A_m обусловлено большой кривизной линии передачи в максимумах и минимумах синусоиды и уменьшением расстояния от них до боковых стенок излучателя.

На рис. 4 приведены зависимости КСВН от частоты при различных значениях k . Ампли-

туда синусоиды $A_m = 5$; длина перехода $L_s = 18$ мм. Так как длина синусоидального перехода остается неизменной, то с увеличением количества полупериодов синусоида "уплотняется" и кривизна линии передачи в максимумах и минимумах синусоиды также увеличивается. Как было обозначено, это приводит к ухудшению согласования внутри рабочего диапазона частот. В то же время с увеличением числа полупериодов переход к щелевому раскрытию удлиняется, трансформация сопротивлений осуществляется плавнее, и рабочая полоса частот становится шире. При $k = 8$ нижняя граница рабочей полосы частот фиксируется на частоте 935 МГц.

На рис. 5 отображено влияние изменения длины синусоидального перехода на согласование на входе элемента АР при $A_m = 5$ и $k = 5$. При малых значениях L_s синусоида получается чрезмерно "уплотненной" и согласование внутри рабочего диапазона ухудшается. При больших значениях L_s оказывается затро-

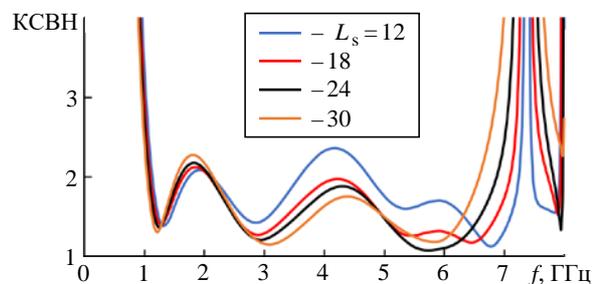


Рис. 5. Зависимости КСВН от частоты при различных значениях длины синусоидального перехода

Fig. 5. Dependence of VSWR on frequency for various values of the sine-shaped transition

нута нижняя часть щелевого раскрыва и рабочая полоса частот обужается сверху.

Выбор значений A_m , k и L_s является компромиссным и должен осуществляться с контролем согласования на входе излучателя в каждом отдельном случае.

Далее сравним характеристики элементарных ячеек двух АР: прототипа и с синусоидальным переходом с параметрами $A_m = 5$; $k = 8$; $L_s = 18$.

На рис. 6 отображены зависимости коэффициента полезного действия (КПД) от частоты. На частотах до 1350 МГц конструкция элемента АР с синусоидой обеспечивает до 30 % большую эффективность по сравнению с прототипом. Однако на частотах, где согласование было наихудшим, снижение КПД по сравнению с прототипом достигает 16 %. КПД элемента с переходом в форме синусоиды не опускается ниже 75 % во всей рабочей полосе частот.

Коэффициент усиления (КУ) элементов АР приводится на рис. 7. На частотах до 1350 МГц элемент с переходом в форме синусоиды обеспечивает преимущество до 2 дБ по сравнению

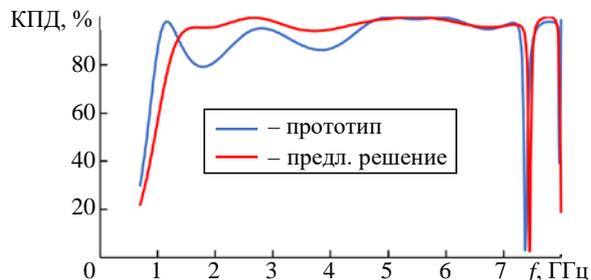


Рис. 6. КПД элементов двух АР: на основе излучателя-прототипа и излучателя с переходом в форме синусоиды

Fig. 6. Radiation efficiency of two unit cells: based on the prototype antenna and an antenna with a sine-shaped transition

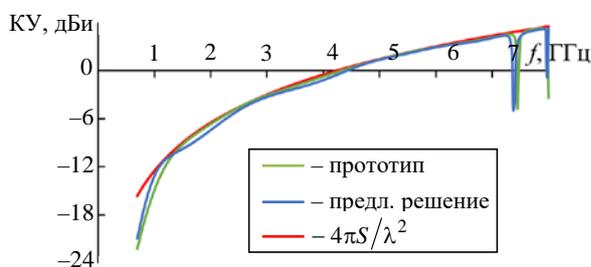


Рис. 7. КУ элементов двух АР на кополяризации в сравнении с теоретически достижимым КНД апертуры такой же площади

Fig. 7. Co-polarization gain of elements of two antenna arrays in comparison with the maximum theoretical gain of the same-size aperture

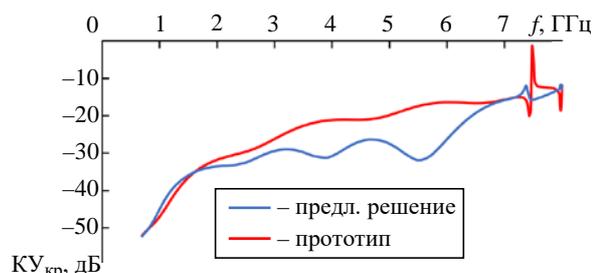


Рис. 8. КУ на кросс-поляризации элементов двух АР: на основе излучателя-прототипа и излучателя с переходом в форме синусоиды

Fig. 8. Cross-polarization gain of two unit cells: based on the prototype antenna and an antenna with a sine-shaped transition

с прототипом. В качестве ориентира приведена зависимость теоретически достижимого коэффициента направленного действия (КНД) апертуры такой же площади, что и элементарные ячейки АР, определяемого по формуле $4\pi S/\lambda^2$, где S – площадь апертуры; λ – длина волны на рассматриваемой частоте [27].

На рис. 8 показаны зависимости коэффициента усиления на кросс-поляризации от частоты. На частотах выше 1600 МГц уровень кросс-поляризации элементарной ячейки с переходом в форме синусоиды оказывается ниже уровня кросс-поляризации элементарной ячейки АР-прототипа. На отдельных частотах разница составляет 15 дБ.

Заключение. Представлены результаты проектирования излучателя АР Вивальди с расширенной полосой рабочих частот. В излучателе переход к щелевому раскрыву удлинен за счет придания ему формы синусоиды. При этом габаритные размеры остались неизменными.

Численно исследовано влияние амплитуды и числа полупериодов синусоиды, а также длины перехода синусоидальной формы на уровень согласования на входе излучателя при работе в составе АР. Показано, что большая кривизна линии передачи в переходе к щелевому раскрыву ухудшает согласование в рабочей полосе частот. Внесение изменений в форму щелевого раскрыва излучателя или чрезмерная кривизна линии передачи вблизи основания раскрыва обужают рабочую полосу частот сверху.

Применение перехода в форме синусоиды позволило понизить нижнюю частоту рабочего диапазона, определяемого по уровню КСВН ≤ 3 , с 1149 до 935 МГц (на 18.6 %). При этом КСВН внутри диапазона не превысил 2.7.

КПД элемента АР с переходом в форме синусоиды не опускается ниже 75 % во всей рабочей полосе частот. Вблизи нижней границы рабочего диапазона конструкция элемента АР с синусоидой обеспечивает до 30 % большую эффективность по сравнению с прототипом.

Показано снижение уровня кросс-поляризации на частотах выше 1600 МГц за счет применения перехода в форме синусоиды. На отдельных частотах уровень кросс-поляризации элементарной ячейки с синусоидальным переходом оказывается ниже уровня кросс-поляризации элементарной

ячейки АР-прототипа на 15 дБ. Авторы полагают, что изогнутая в форме синусоиды линия передачи является преградой на пути токов, протекающих в продольной плоскости на кромках щелевого раскрытия. Однако это предположение требует проведения отдельного исследования.

Также будущие исследования излучателя Вивальди с переходом в форме синусоиды будут направлены на изучение возможности разработки двухполяризационных АР и исследование характеристик АР при сканировании луча диаграммы направленности в пространстве.

Список литературы

1. Gibson P. J. The Vivaldi Aerial // 1979 9th European Microwave Conf. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. IEEE, 1979. P. 101–105. doi: 10.1109/EUMA.1979.332681
2. A low-profile broadband phased array antenna / B. Munk, R. Taylor, T. Durharn, T. Durharn, B. Pigon, R. Boozer, S. Brown, M. Jones, J. Pryor, S. Ortiz, J. Rawnick, K. Krebs, M. Vanstrum, G. Gothard, D. Wiebelt // Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Columbus, USA, 22–27 June 2003. IEEE, 2003. P. 448–451. doi: 10.1109/APS.2003.1219272
3. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, № 1. P. 130–140. doi: 10.1109/TAP.2011.2167916
4. A New Class of Planar Ultrawideband Modular Antenna Arrays With Improved Bandwidth / J. T. Logan, R. W. Kindt, M. Y. Lee, M. N. Vouvakis // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, № 2. P. 692–701. doi: 10.1109/TAP.2017.2780878
5. A review of Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Arrays / J. T. Logan, S. S. Holland, D. H. Schaubert, R. W. Kindt, M. N. Vouvakis // Intern. Symp. on Electromagnetic Theory. Hiroshima, Japan, 20–24 May 2013. IEEE, 2013. P. 868–871.
6. Doane J. P., Sertel K., Volakis J. L. A Wideband, Wide Scanning Tightly Coupled Dipole Array With Integrated Balun (TCDA-IB) // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61, № 9. P. 4538–4548. doi: 10.1109/TAP.2013.2267199
7. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Banyan Tree Antenna Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, № 11. P. 4060–4070. doi: 10.1109/TAP.2011.2164177
8. Logan J. T., Kindt R. W., Vouvakis M. N. A 1.2–12 GHz Sliced Notch Antenna Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, № 4. P. 1818–1826. doi: 10.1109/TAP.2018.2809476
9. Joon Shin, Schaubert D. H. A parameter study of stripline-fed Vivaldi notch-antenna arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999. Vol. 47, № 5. P. 879–886. doi: 10.1109/8.774151
10. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas / T. Latha, G. Ram, G. A. Kumar, M. Chakravarthy // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 129742–129755. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114344
11. Gazit E. Improved design of the Vivaldi antenna // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. 1988. Vol. 135, № 2. P. 89–92. doi: 10.1049/ip-h-2.1988.0020
12. Ultra-wideband low-cost phased-array radars / C. T. Rodenbeck, Sang-Gyu Kim, Wen-Hua Tu, M. R. Coutant, Seungpyo Hong, Mingyi Li, Kai Chang // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, № 12. P. 3697–3703. doi: 10.1109/TMTT.2005.856668
13. Nassar I. T., Weller T. M. A Novel Method for Improving Antipodal Vivaldi Antenna Performance // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol. 63, № 7. P. 3321–3324. doi: 10.1109/TAP.2015.2429749
14. Vivaldi Antenna Arrays for Wide Bandwidth and Electronic Scanning / D. H. Schaubert, S. Kasturi, A. O. Boryssenko, W. M. Elsallal // The Second European Conf. on Antennas and Propagation, Edinburgh, 11–16 Nov. 2007. IEEE, 2007. P. 1–6. doi: 10.1049/ic.2007.1334
15. Logan J. T., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Low Cross-Polarization Vivaldi Arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, № 4. P. 1827–1837. doi: 10.1109/TAP.2018.2809492
16. Schaubert D. H., Joon Shin, Wunsch G. Characteristics of single-polarized phased array of tapered slot antennas // Proc. of Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Boston, USA, 15–18 Oct. 1996. IEEE, 1996. P. 102–106. doi: 10.1109/PAST.1996.565944
17. Polarization properties of scanning arrays / D. T. McGrath, N. Schuneman, T. H. Shively, J. Irion // IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Boston, USA, 14–17 Oct. 2003. IEEE, 2003. P. 295–299. doi: 10.1109/PAST.2003.1256997
18. Kindt R., Taylor D. Polarization correction in dual-polarized phased arrays of flared notches // 2011 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation (AP-SURSI), Spokane, USA, 03–08 July 2011. IEEE, 2011. P. 1961–1964. doi: 10.1109/APS.2011.5996888
19. Kindt R. W., Logan J. T. Dual-Polarized Metal-Flare Sliced Notch Antenna Array // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 68, № 4. P. 2666–2674. doi: 10.1109/TAP.2020.2969724

20. Dual-polarized sliced notch array – ultrawideband flares with exceptional polarization control / R. Kindt, R. Mital, J. Logan, M. Vouvakis // IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832628

21. Kindt R. W., Logan J. T. Single-Polarization Vivaldi Antenna Array with Orthogonal Walls for Improved Polarization Purity // IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, USA, 11–14 Oct. 2022. IEEE, 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975104

22. Kindt R. W., Logan J. T. Cross-Polarization Treatment in Linearly Polarized Vivaldi Array Apertures // IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, USA, 11–14 Oct. 2022. IEEE, 2022. P. 01–04. doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975012

23. Yukhanov Yu. V., Bobkov I. N. Linear Vivaldi Antenna Array With Improved Low-Band Performance // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 28 June 2021 – 02

July 2021. IEEE, 2021. P. 203–206. doi: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494118

24. Пат. RU 203479 U1 H01Q 1/38 (2006.01). Модернизированная сверхширокополосная антенна Вивальди / Ю. В. Юханов, Т. Ю. Привалова, И. В. Мерглодов, И. В. Ильин, И. Н. Бобков; опублик. 07.04.2021.

25. Kindt R. W., Logan J. T. Benchmarking Ultrawideband Phased Antenna Arrays: Striving for Clearer and More Informative Reporting Practices // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2018. Vol. 60, № 3. P. 34–47. doi: 10.1109/MAP.2018.2818464

26. Schaubert D. H. A gap-induced element resonance in single-polarized arrays of notch antennas // Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symp. and URSI National Radio Science Meeting, Seattle, USA, 20–24 June 1994. IEEE, 1994. Vol. 2. P. 1264–1267. doi: 10.1109/APS.1994.407859

27. Pozar D. M. The active element pattern // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1994. Vol. 42, № 8. P. 1176–1178. doi: 10.1109/8.310010

Информация об авторах

Иван Николаевич Бобков – инженер по специальности "Средства радиоэлектронной борьбы" (2011, Южный федеральный университет), научный сотрудник передовой инженерной школы "Инженерия кибер-платформ" Южного федерального университета. Автор 8 научных работ. Сфера научных интересов: теория и практика антенных решеток; СВЧ-устройства и технологии.

Адрес: Южный федеральный университет, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, 347900, Россия

E-mail: antennadesign@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-6923-7917>

Юрий Владимирович Юханов – доктор технических наук (1997), профессор (2000), заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета. Автор 252 научных работ. Сфера научных интересов: электродинамика и распространение радиоволн; синтез импедансных структур по заданным характеристикам излучения и рассеяния.

Адрес: Южный федеральный университет, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, 347900, Россия

E-mail: yu_yukhanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>

References

1. Gibson P. J. The Vivaldi Aerial. 1979 9th European Microwave Conf. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. IEEE, 1979, pp. 101–105. doi: 10.1109/EUMA.1979.332681

2. Munk B., Taylor R., Durharn T., Durharn T., Pignon B., Boozer R., Brown S., Jones M., Pryor J., Ortiz S., Rawnick J., Krebs K., Vanstrum M., Gothard G., Wiebelt D. A Low-Profile Broadband Phased Array Antenna. Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Columbus, USA. 22–27 June 2003. IEEE, 2003, pp. 448–451. doi: 10.1109/APS.2003.1219272

3. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012, vol. 60, no. 1, pp. 130–140. doi: 10.1109/TAP.2011.2167916

4. Logan J. T., Kindt R. W., Lee M. Y., Vouvakis M. N. A New Class of Planar Ultrawideband Modular Antenna Arrays With Improved Bandwidth. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018, vol. 66, no. 2, pp. 692–701. doi: 10.1109/TAP.2017.2780878

5. Logan J. T., Holland S. S., Schaubert D. H., Kindt R. W., Vouvakis M. N. A Review of Planar Ultrawideband Modular Antenna (PUMA) Arrays. Intern. Symp. on Electromagnetic Theory. Hiroshima, Japan, 20–24 May 2013. IEEE, 2013, pp. 868–871.

6. Doane J. P., Sertel K., Volakis J. L. A Wideband, Wide Scanning Tightly Coupled Dipole Array With Integrated Balun (TCDA-IB). IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013, vol. 61, no. 9, pp. 4538–4548. doi: 10.1109/TAP.2013.2267199

7. Holland S. S., Vouvakis M. N. The Banyan Tree Antenna Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011, vol. 59, no. 11, pp. 4060–4070. doi: 10.1109/TAP.2011.2164177

8. Logan J. T., Kindt R. W., Vouvakis M. N. A 1.2–12 GHz Sliced Notch Antenna Array. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018, vol. 66, no. 4, pp. 1818–1826. doi: 10.1109/TAP.2018.2809476

9. Joon Shin, Schaubert D. H. A Parameter Study of Stripline-Fed Vivaldi Notch-Antenna Arrays. IEEE

Transactions on Antennas and Propagation. 1999, vol. 47, no. 5, pp. 879–886. doi: 10.1109/8.774151

10. Latha T., Ram G., Kumar G. A., Chakravarthy M. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas. IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 129742–129755. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3114344

11. Gazit E. Improved Design of the Vivaldi Antenna. IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. 1988, vol. 135, no. 2, pp. 89–92. doi: 10.1049/ip-h-2.1988.0020

12. Rodenbeck C. T., Sang-Gyu Kim, Wen-Hua Tu, Coutant M. R., Seungpyo Hong, Mingyi Li, Kai Chang. Ultra-Wideband Low-Cost Phased-Array Radars. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, no. 12, pp. 3697–3703. doi: 10.1109/TMTT.2005.856668

13. Nassar I. T., Weller T. M. A Novel Method for Improving Antipodal Vivaldi Antenna Performance. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015, vol. 63, no. 7, pp. 3321–3324. doi: 10.1109/TAP.2015.2429749

14. Schaubert D. H., Kasturi S., Boryssenko A. O., Elsallal W. M. Vivaldi Antenna Arrays for Wide Bandwidth and Electronic Scanning. The Second European Conf. on Antennas and Propagation, Edinburgh, 11–16 Nov. 2007. IEEE, 2007, pp. 1–6. doi: 10.1049/ic.2007.1334

15. Logan J. T., Kindt R. W., Vouvakis M. N. Low Cross-Polarization Vivaldi Arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018, vol. 66, no. 4, pp. 1827–1837. doi: 10.1109/TAP.2018.2809492

16. Schaubert D. H., Joon Shin, Wunsch G. Characteristics of Single-Polarized Phased Array of Tapered Slot Antennas. Proc. of Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Boston, USA, 15–18 Oct. 1996. IEEE, 1996, pp. 102–106. doi: 10.1109/PAST.1996.565944

17. McGrath D. T., Schuneman N., Shively T. H., Irion J. Polarization Properties of Scanning Arrays. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology, Boston, USA, 14–17 Oct. 2003. IEEE, 2003, pp. 295–299. doi: 10.1109/PAST.2003.1256997

18. Kindt R., Taylor D. Polarization Correction in Dual-Polarized Phased Arrays of Flared Notches. 2011 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation (AP-SURSI), Spokane, USA, 03–08 July 2011. IEEE, 2011, pp. 1961–1964. doi: 10.1109/APS.2011.5996888

19. Kindt R. W., Logan J. T. Dual-Polarized Metal-Flare Sliced Notch Antenna Array. IEEE Transactions

on Antennas and Propagation. 2020, vol. 68, no. 4, pp. 2666–2674. doi: 10.1109/TAP.2020.2969724

20. Kindt R., Mital R., Logan J., Vouvakis M. Dual-Polarized Sliced Notch Array – Ultra-Wideband Flares with Exceptional Polarization Control. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, USA, 18–21 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ARRAY.2016.7832628

21. Kindt R. W., Logan J. T. Single-Polarization Vivaldi Antenna Array with Orthogonal Walls for Improved Polarization Purity. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, USA, 11–14 Oct. 2022. IEEE, 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975104

22. Kindt R. W., Logan J. T. Cross-Polarization Treatment in Linearly Polarized Vivaldi Array Apertures. IEEE Intern. Symp. on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, USA, 11–14 Oct. 2022. IEEE, 2022, pp. 01–04. doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975012

23. Yukhanov Yu. V., Bobkov I. N. Linear Vivaldi Antenna Array with Improved Low-Band Performance. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 28 June 2021 – 02 July 2021. IEEE, 2021, pp. 203–206. doi: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494118

24. Yukhanov Yu. V., Privalova T. Yu., Merglodov I. V., Ilyin I. V., Bobkov I. N. *Modernizirovannaya sverhshirokopolosnaya antenna Vival'di* [Modernized Ultra-Wideband Vivaldi Antenna]. Patent RU, no. 203479, 2021. (In Russ.)

25. Kindt R. W., Logan J. T. Benchmarking Ultrawideband Phased Antenna Arrays: Striving for Clearer and More Informative Reporting Practices. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2018, vol. 60, no. 3, pp. 34–47. doi: 10.1109/MAP.2018.2818464

26. Schaubert D. H. A Gap-Induced Element Resonance in Single-Polarized Arrays of Notch Antennas. Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symp. and URSI National Radio Science Meeting, Seattle, USA, 20–24 June 1994. IEEE, 1994, vol. 2, pp. 1264–1267. doi: 10.1109/APS.1994.407859

27. Pozar D. M. The Active Element Pattern. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1994, vol. 42, no. 8, pp. 1176–1178. doi: 10.1109/8.310010

Information about the authors

Ivan N. Bobkov, Engineer's degree in electrical engineering (2011, Southern Federal University), researcher at Advanced engineering school in Cyberplatform Engineering of Southern Federal University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: theory and application of antenna arrays; microwave theory and techniques.

Address: Southern Federal University, 44, Nekrasovsky Per., Taganrog 347900, Russia

E-mail: antennadesign@outlook.com

<https://orcid.org/0000-0002-6923-7917>

Yury V. Yukhanov, Dr Sci. (Eng.) (1997), Professor (2000), Head of the Antenna and Radio Transmitter Department at Institute of Radioengineering Systems and Control of Southern Federal University. The author of 252 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic scattering theory and application; analysis and synthesis of impedance surfaces.

Address: Southern Federal University, 44, Nekrasovsky Per., Taganrog 347900, Russia

E-mail: yu_yukhanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>