

Раздел III. Электроника, приборостроение и радиотехника

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-205-214

И.Н. Бобков, Ю.В. Юханов

ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ВИВАЛЬДИ С УМЕНЬШЕННОЙ ВЫСОТОЙ ПРОФИЛЯ

Исследован элемент плоской антенной решетки Вивальди, предназначенной для работы на двух линейных поляризациях. Излучатели антенной решетки представляют диэлектрические подложки с двусторонней металлизацией и состоят из расширяющегося щелевого раскрытия, распределенного симметрирующего трансформатора и короткого отрезка микрополосковой линии. При этом длина симметрирующего трансформатора уменьшена за счёт придания ему формы синусоиды и, таким образом, уменьшен продольный размер излучателей и высота профиля всей антенной решетки. Соединение соседних излучателей осуществляется при помощи металлических столбиков, расположенных на металлическом экране. Представлены результаты численного исследования характеристик согласования и излучения элементарной ячейки с периодическими граничными условиями на гранях. Показано, что несмотря на уменьшение длины излучателей Вивальди, за счёт миниатюризации распределенного симметрирующего трансформатора, в антенной решетке не происходит сужения полосы рабочих частот. Расчётный коэффициент усиления элементарной ячейки близок к теоретически достижимому коэффициенту направленного действия апертуры такой же площади, что и элементарная ячейка. Коэффициент полезного действия при излучении по нормали не опускается ниже 75% во всей полосе рабочих частот. Проведенное исследование характеристик излучения при сканировании луча диаграммы направленности в Е-, Н- и D-плоскостях показало возможность отклонения луча на 60° без появления эффекта «ослепления» антенной решетки. Установлено влияние развязки между ближайшими ортогональными элементами антенной решетки на КПД при сканировании луча в диагональной плоскости. Представленные результаты исследования кросс-поляризационных характеристик элемента при отклонении луча на угол 45° в D-плоскости показывают, что коэффициент усиления элементарной ячейки на кросс-поляризации меньше коэффициента усиления на ко-поляризации на значение от 6 до 15 дБ. Полоса рабочих частот, определяемая по уровню КСВН ≤ 3 , составила от 915 до 7500 МГц.

Антенные решетки; антенны Вивальди; направленные антенны; излучатели; щелевой раскрыв; распределенный симметрирующий трансформатор.

I.N. Bobkov, Y.V. Yukhanov

A DUAL-POLARIZED TAPERED SLOT ANTENNA ARRAY WITH REDUCED PROFILE HEIGHT

An element of a planar Vivaldi antenna array designed to operate on two linear polarizations is considered. The antenna array element is made of a dielectric substrate with double-sided metallization and consist of a tapered slot, a balun and a short section of microstrip line. At the same time, the length of the balun is reduced by making it sine-shaped and, thus, the longitudinal size of the Vivaldi element and the profile height of the entire antenna array are reduced. The connection between adjacent elements of the antenna array is carried out using metal posts placed on a metal screen. The results of a numerical study of the matching and radiation characteristics of a unit-cell with periodic boundary conditions on the faces are presented. It is shown that despite the reduction of the length of the Vivaldi antennas, due to the miniaturization of the balun, there is no narrowing of the operating frequency band in the antenna array. The calculated gain of the unit-cell is close to the theoretically achievable directivity of the aperture of the same area as the unit-cell. The broadside radiation efficiency does not fall below 75% over the entire

operating frequency range. A study of the radiation characteristics when scanning the beam of the radiation pattern in the E-, H- and D-planes showed the possibility of deflecting the beam by an 60° angle without the appearance of antenna array blinding effects. The effect of small isolation between the nearest orthogonal elements of the antenna array on the matching at the input of the elements when scanning a beam in a diagonal plane is shown. The presented results of a study of the cross-polarization characteristics of the element when the beam is deflected at an angle of 45° in the D-plane show that the cross-polarization gain of the unit-cell is less than the co-polarization gain by an amount from 6 to 15 dB. The operating frequency band, determined by the $VSWR \leq 3$ level, ranged from 915 to 7500 MHz.

Antenna arrays; Vivaldi antennas; directional antennas; profile height; unit-cell.

Введение. Антенные решетки (АР) Вивальди [1] обладают рядом достоинств, среди которых особо выделяется возможность работы в сверхширокой полосе частот. Однако для обеспечения сверхширокополосного согласования на входе элементов таких АР необходимо увеличивать продольные размеры излучателей [2].

При синтезе плоских АР, количество элементов в которых может исчисляться десятками тысяч [3], применение электрически длинных антенн увеличивает расход материалов, утяжеляет и усложняет конструкцию АР и вспомогательных несущих деталей. Другим менее явным следствием применения электрически длинных элементов является высокий уровень кросс-поляризации при сканировании луча вне основных плоскостей [4, 5].

Проблеме высокого уровня кросс-поляризации в сверхширокополосных АР Вивальди в последние годы уделяется значительное внимание. Предложены улучшенные конструкции излучателей [5–9] и найдены способы улучшения кросс-поляризационных характеристик плоских АР линейной поляризации [10, 11].

В то же время работы, посвященные таким прикладным вопросам, как уменьшение электрических размеров (прежде всего высоты профиля) и массы АР Вивальди, широко не представлены. В названиях опубликованных статей и докладов конференций встречается слово «компактный» по отношению к АР Вивальди, но либо описанные решения не являются сверхширокополосными [12, 13], либо являются компактными лишь в смысле применения малого количества элементов (которые при этом являются электрически длинными) [14].

Представленные в литературе действительно низкопрофильные и при этом сверхширокополосные плоские АР Вивальди либо подразумевают наличие побочных главных максимумов диаграммы направленности (ДН) (т.е. являются сверхширокополосными за счёт диапазона, расположенного выше частоты $f_h \approx c/2d$, где c – скорость света в вакууме, d – шаг АР) [15], либо работают за счёт обеспечения сильной связи и противофазного питания между соседними элементами, и скорее представляют собой АР сильно связанных диполей, чем традиционные АР Вивальди [16].

В настоящей работе исследованы характеристики элементарной ячейки двухполяризационной АР антиподальных [17] излучателей Вивальди, в которой продольные размеры излучателей уменьшены за счёт миниатюризации распределенного симметрирующего трансформатора [18, 19]. Таким образом достигнуто уменьшение высоты профиля всей антенной решетки. В качестве прототипа выбрана плоская АР Вивальди линейной поляризации, исследованная в [9], где подробно описано построение синусоидального симметрирующего трансформатора и влияние его геометрических параметров на характеристики АР.

Модель элементарной ячейки. Общий вид элементарной ячейки двухполяризационной антенной решетки Вивальди с уменьшенной высотой профиля представлен на рис. 1. На верхней и нижней поверхностях элементарной ячейки заданы граничные условия (ГУ) излучения, периодические ГУ заданы на боковых поверхностях А, А' и Б, Б'. Излучатели выполнены на диэлектрической подложке с $\epsilon_r=3.55$, $\tan(\delta)=0.0027$ толщиной 508 мкм. Шаг АР составляет 20 мм, высота излучателей над поверхностью металлического экрана $h=60$ мм. Питание осуществляется при помощи коаксиальных соединителей типа IX.

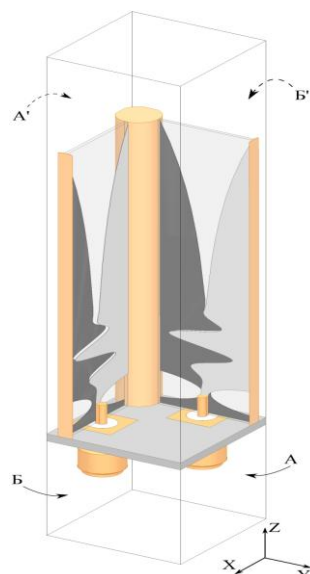


Рис. 1. Общий вид элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди с уменьшенной высотой профиля

Конструкция отличается от традиционной антиподальной [17] формы симметрирующего трансформатора. Как показано в [9], применение симметрирующего трансформатора в форме синусоиды позволяет осуществлять более плавную трансформацию сопротивления на пути к раскрытию и тем самым сместить нижнюю границу рабочей полосы в область более низких частот. Этим расширением полосы частот можно пожертвовать для уменьшения высоты профиля АР [19], поскольку отношение высоты излучателя АР Вивальди к его ширине находится в прямой зависимости от ширины полосы рабочих частот АР [5].

Таким образом за счёт применения синусоидального симметрирующего трансформатора возможна разработка АР Вивальди с уменьшенной высотой профиля и такой же шириной полосы рабочих частот, что и у полноразмерных аналогов [19].

Результаты численного исследования. В программном обеспечении Ansys HFSS проведено численное исследование характеристик элементарной ячейки, изображенной на рис. 1.

На рис. 2 приведены рассчитанные зависимости КСВН на входе одного излучателя элементарной ячейки от частоты. Для сравнения приводятся ещё две зависимости КСВН на входе излучателей элементарных ячеек без синусоидальных симметрирующих трансформаторов: высотой 60 и 79 мм. В качестве верхней границы полосы рабочих частот принимается 7.5 ГГц. На этой частоте шаг АР начинает превышать половину длины волны и возможно появление побочных главных максимумов ДН [9].

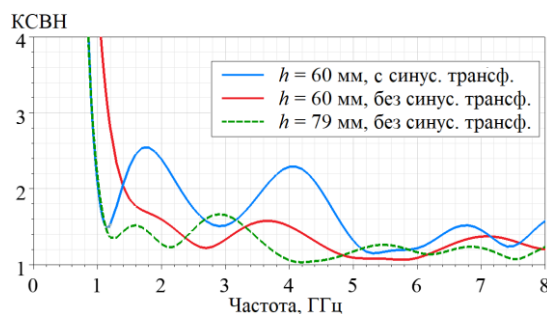


Рис. 2. КСВН на входе излучателей Вивальди трёх элементарных ячеек

Для элементарной ячейки высотой 60 мм с синусоидальными симметрирующими трансформаторами нижняя граница рабочей полосы частот, определяемая по уровню КСВН=3, находится на частоте 915 МГц. Для элементарной ячейки такой же высоты с традиционными симметрирующими трансформаторами (без синусоиды) нижняя граница определяется на частоте 1170 МГц (см. рис. 2).

Чтобы получить нижнюю границу рабочей полосы частот АР на частоте 915 МГц с традиционными излучателями Вивальди (без синусоиды), их длина должна составлять 79 мм при прочих неизменных геометрических параметрах. Это на 31% больше решения с симметрирующим трансформатором в форме синусоиды.

Зависимость коэффициента полезного действия (КПД) элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди с уменьшенной высотой профиля от частоты приведена на рис. 3. В диапазоне рабочих частот 915–7500 МГц КПД превышает 75%.

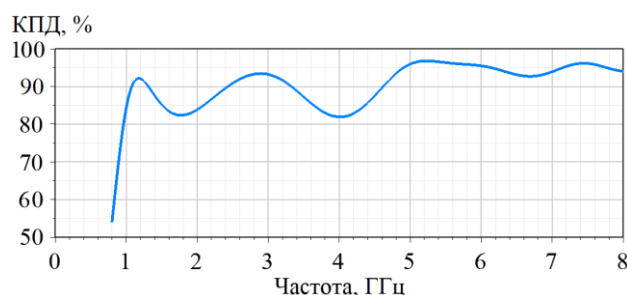


Рис. 3. КПД элементарной ячейки АР Вивальди с уменьшенной высотой профиля

Зависимость коэффициента усиления (КУ) элементарной ячейки от частоты дана на рис. 4. Для сравнения приводится теоретический коэффициент направленного действия (КНД) D апертуры такой же площади A , что и элементарная ячейка, определяемый по формуле [20]:

$$D = 4\pi A \cos \theta / \lambda^2,$$

где θ – угол сканирования луча (принят равным нулю) и λ – длина волны. Из рис. 4 видно, что КУ элементарной ячейки близок к теоретическому КНД апертуры площади A . Понижение КУ наблюдается на частотах, где согласование на входе излучателя Вивальди было наихудшим (см. рис. 2).

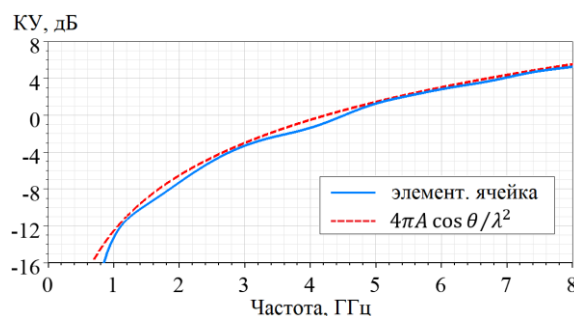


Рис. 4. КУ элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди с уменьшенной высотой профиля в сравнении с КНД апертуры такой же площади

Важно исследовать вопросы согласования и развязки между ортогональными излучателями элементарной ячейки при сканировании луча ДН в пространстве. Ниже даны результаты, полученные для режима возбуждения одного излучателя элементарной ячейки, в то время как второй, ортогональный, излучатель нагружен на согласованную нагрузку.

На рис. 5 показаны зависимости КСВН от частоты при различных углах сканирования ДН в E -плоскости. Кривые для углов более 60° не приводятся, поскольку уже при наклоне луча на 60° КСВН на входе излучателя элементарной ячейки превышает 5. Тем не менее, из рис. 5 видно, что эффекта «ослепления» АР не наблюдается во всём секторе углов сканирования.

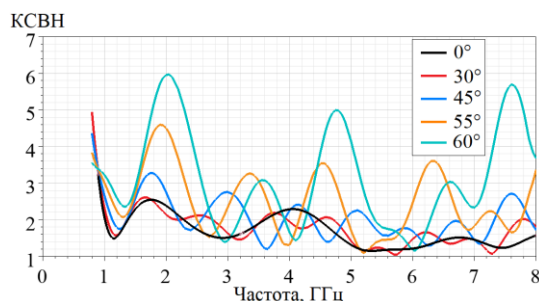


Рис. 5. КСВН на входе излучателя двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в E -плоскости

Развязка между ортогональными излучателями элементарной ячейки при различных углах сканирования ДН в E -плоскости приводится на рис. 6. На частотах до 1300 МГц развязка составляет от -13 до -20 дБ. На остальных частотах развязка превышает -20 дБ для всех углов сканирования, за исключением локального превышения на частотах 6600-7070 МГц при угле 60° .

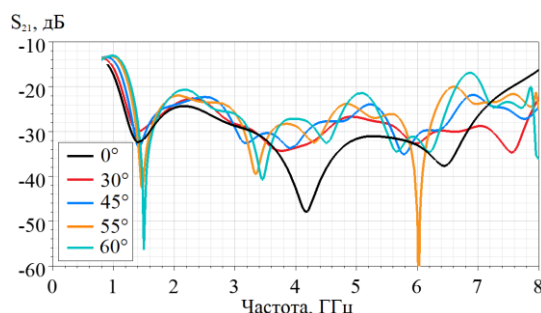


Рис. 6. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в E -плоскости

Рассчитанные значения КСВН при сканировании луча в H -плоскости показаны на рис. 7. В нижней части рабочего диапазона частот согласование на входе излучателя элементарной ячейки с увеличением угла сканирования ухудшается. Такое сужение рабочей полосы частот при сканировании луча ДН в H -плоскости является характерным для многих фазированных АР [21].

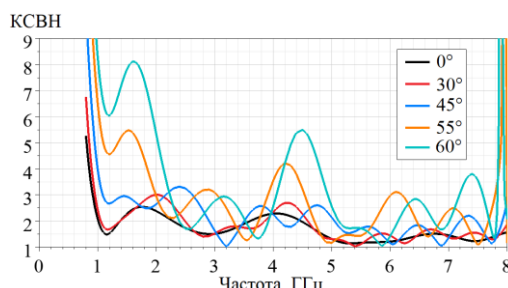


Рис. 7. КСВН на входе излучателя двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в H -плоскости

Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки при сканировании в H -плоскости (рис. 8) качественно повторяет значения, полученные при сканировании луча ДН в E -плоскости.

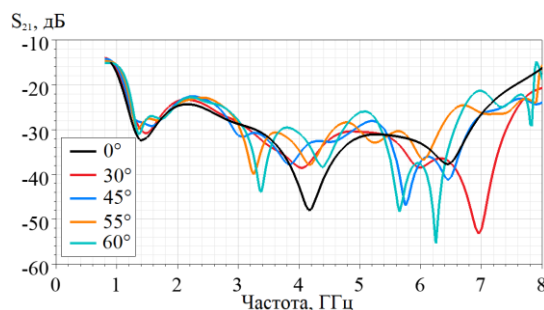


Рис. 8. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в H -плоскости

При сканировании луча ДН в D -плоскости (диагональная плоскость; угол $\varphi=45^\circ$) эффекта «ослепления» АР не возникает во всем исследуемом секторе углов (рис. 9). Согласование на входе излучателя элементарной ячейки оказывается лучше, чем при сканировании в H -плоскости.

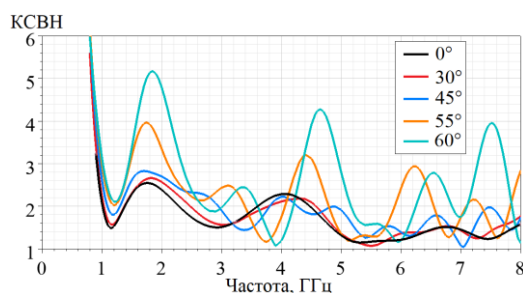


Рис. 9. КСВН на входе излучателя двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в D -плоскости

Такие результаты могут ввести в заблуждение и создать ложное ощущение хорошей производительности АР при сканировании в диагональной плоскости. Однако из-за малой развязки между излучателями при сканировании в D -плоскости (рис. 10) значительная часть подводимой к излучателю мощности не излучается в свободное пространство, а поступает на соседние излучатели АР [21].

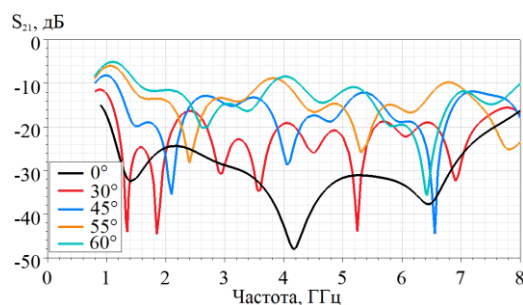


Рис. 10. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при различных углах сканирования в D -плоскости

В качестве примера можно рассмотреть частоту 1.2 ГГц при угле сканирования 60° . КСВН на этой частоте равен 2.1 (см. рис. 9), что соответствует 0.58 дБ потерь на рассогласование. Однако развязка между ортогональными портами элементарной ячейки составляет всего минус 5 дБ (см. рис. 10). По этой причине из зависимостей КПД от частоты при различных углах сканирования в D -плоскости (рис. 11) видно, что КПД излучателя элементарной ячейки на частоте 1.2 ГГц составляет только 55%.

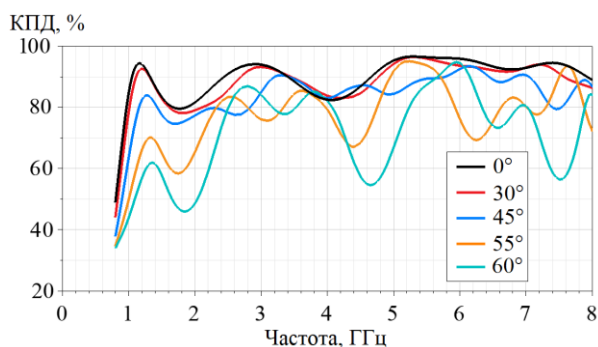


Рис. 11. КПД излучателя элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при различных углах наклона луча ДН в D -плоскости

АР Вивальди из-за большой электрической длины излучателей отличаются высоким уровнем кроссполяризации. Для АР Вивальди с перекрытием полосы частот более 7:1 характерно превышение уровня кросс-поляризации над уровнем ко-поляризации при сканировании в D -плоскости [5]. Однако за счёт уменьшенной высоты профиля и применения симметрирующего трансформатора в форме синусоиды, при наклоне луча на 45° в D -плоскости, КУ элементарной ячейки на кросс-поляризации оказывается меньше КУ на ко-поляризации на значение от 6 до 15 дБ (рис. 12).

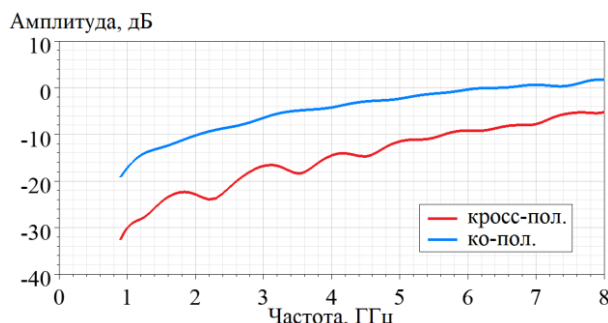


Рис. 12. КУ на ко- и кросс-поляризации элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при наклоне луча на 45° в D -плоскости

Выводы. Исследована элементарная ячейка двухполяризационной АР Вивальди, в которой для уменьшения продольных размеров излучателей применены распределенные симметрирующие трансформаторы в форме синусоиды.

Полоса рабочих частот, определяемая по уровню $КСВН \leq 3$ составляет от 915 до 7500 МГц. При этой ширине полосы рабочих частот элементарная ячейка имеет на 31% меньшую высоту, чем элементарная ячейка конвенциональной АР антиподальных излучателей Вивальди. Коэффициент усиления элементарной ячейки принимает значения, близкие к КНД апертуры такой же площади, при этом КПД в полосе рабочих частот превышает 75%.

Результаты расчётов показывают отсутствие эффекта «ослепления» АР при сканировании ДН в E -, H - и D -плоскостях вплоть до угла 60° .

Показано, что, несмотря на хорошее согласование, малая развязка между ортогональными портами элементарной ячейки обеспечивает снижение КПД при сканировании в D-плоскости.

Исследование выполнено за счёт 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».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial // 1979 9th European Microwave Conf. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. – IEEE, 1979. – P. 101-105.
2. 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. – P. 879-886.
3. Ruiter M., van der Wal E. EMBRACE, a 10000 element next generation aperture array telescope // 2009 European Microwave Conference (EuMC), Rome, Italy, 2009. – P. 326-329.
4. 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. – P. 295-299.
5. 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. – P. 1827-1837.
6. 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. – P. 1818-1826.
7. Bobkov I.N., Sobol D.D., Yukhanov Y.V. Low Cross-Polarization Vivaldi Antenna Fed with CPW–Slotline Transition // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. – P. 629-632.
8. 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. – P. 2666-2674.
9. Бобков И.Н., Юханов Ю.В. Исследование характеристик элемента плоской антенной решетки Вивальди с расширенной полосой рабочих частот // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2024. – 27 (1). – С. 48-56.
10. Kindt R.W., Logan J.T. Single-Polarization Vivaldi Antenna Array with Orthogonal Walls for Improved Polarization Purity // IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. – P. 1-4.
11. Kindt R.W., Logan J.T. Cross-Polarization Treatment in Linearly Polarized Vivaldi Array Apertures // IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. – P. 01-04.
12. Guo L., Qiang Y. F. Design of a Compact Wideband Dual-Polarization Antipodal Vivaldi Antenna Array // 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Chengdu, China, 2018. – P. 1-3.
13. Yang Yunqiang, Wang Y., Aly Fathy Design of Compact Vivaldi Antenna Arrays for UWB See through Wall Applications // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – Vol. 82. – P. 401-418.
14. Hodgkinson C.J., Anagnostou D.E., Podilchak S.K. Compact Antipodal Vivaldi Array with UWB Beam Steering and Element AMC Inclusions for Scattering Reduction // in IEEE Access.
15. Liu, J., Xu C., Yu H. et al. Design of a miniaturized ultrawideband and low scattering antipodal vivaldi antenna array // Sci Rep. – 2021. – 11. – 12499.
16. Elsallal M.W., Schaubert D.H. Electronically scanned arrays of dual-polarized, doubly-mirrored balanced antipodal Vivaldi antennas (DmBAVA) based on modular elements // 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, NM, USA, 2006. – P. 887-890.
17. Gazit E. Improved design of the Vivaldi antenna // IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation. – 1988. – Vol. 135, No. 2. – P. 89-92.
18. Патент RU 203479 U1 H01Q 1/38 (2006.01). Модернизированная сверхширокополосная антенна Вивальди / Юханов Ю.В., Привалова Т.Ю., Мерглов И.В., Ильин И.В., Бобков И.Н.; опубл. 07.04.2021.
19. Yukhanov Y.V., Bobkov I.N. Linear Vivaldi Antenna Array with Improved Low-Band Performance // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia. – 2021. – P. 203-206.
20. Pozar D.M. The active element pattern // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1994. – Vol. 42, No. 8. – P. 1176-1178.
21. 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. – P. 34-47.

REFERENCES

1. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial, 1979 9th European Microwave Conf. Brighton, UK, 17–20 Sept. 1979. IEEE, 1979, pp. 101-105.
2. 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.
3. Ruiter M., van der Wal E. EMBRACE, a 10000 element next generation aperture array telescope, 2009 European Microwave Conference (EuMC), Rome, Italy, 2009, pp. 326-329.
4. McGrath D.T., Schuneman N., Shively T.H., Irton 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.
5. 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.
6. 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.
7. Bobkov I.N., Sobol D.D., Yukhanov Y.V. Low Cross-Polarization Vivaldi Antenna Fed with CPW–Slotline Transition, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 629-632.
8. 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.
9. Bobkov I.N., Yukhanov Yu.V. Issledovanie kharakteristik elementa ploskoy antennoy reshetki Vival'di s rasshirennoy polosoy rabochikh chastot [Study of characteristics of an element of a flat Vivaldi antenna array with an extended operating frequency band], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics], 2024, 27 (1), pp. 48-56.
10. Kindt R.W., Logan J.T. Single-Polarization Vivaldi Antenna Array with Orthogonal Walls for Improved Polarization Purity, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2022, pp. 1-4.
11. Kindt R.W., Logan J.T. Cross-Polarization Treatment in Linearly Polarized Vivaldi Array Apertures, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2022, pp. 01-04.
12. Guo L., Qiang Y.F. Design of a Compact Wideband Dual-Polarization Antipodal Vivaldi Antenna Array, 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Chengdu, China, 2018, pp. 1-3.
13. Yang Yunqiang, Wang Y., Aly Fathy Design of Compact Vivaldi Antenna Arrays for UWB See through Wall Applications, *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, Vol. 82, pp. 401-418,.
14. Hodgkinson C.J., Anagnostou D.E., Podilchak S.K. Compact Antipodal Vivaldi Array with UWB Beam Steering and Element AMC Inclusions for Scattering Reduction, in *IEEE Access*.
15. Liu, J., Xu C., Yu H. et al. Design of a miniaturized ultrawideband and low scattering antipodal vivaldi antenna array, *Sci Rep.* – 2021. – 11. – 12499.
16. Elsallal M.W., Schaubert D.H. Electronically scanned arrays of dual-polarized, doubly-mirrored balanced antipodal Vivaldi antennas (DmBAVA) based on modular elements, 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, NM, USA, 2006, pp. 887-890.
17. Gazit E. Improved design of the Vivaldi antenna, *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation*, 1988, Vol. 135, No 2, pp. 89-92.
18. Yukhanov Yu.V., Privalova T.Yu., Merglodov I.V., Il'in I.V., Bobkov I.N. Patent RU 203479 U1 H01Q 1/38 (2006.01). Modernizirovannaya sverkhshirokopolosnaya antenna Vival'di [Patent RU 203479 U1 H01Q 1/38 (2006.01). Upgraded ultra-wideband Vivaldi antenna]; publ. 04/07/2021.
19. Yukhanov Y.V., Bobkov I.N. Linear Vivaldi Antenna Array with Improved Low-Band Performance, 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2021, pp. 203-206.
20. Pozar D.M. The active element pattern, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994. Vol. 42, No. 8, pp. 1176-1178.
21. 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.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Бобков Иван Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: antennadesign@outlook.com; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; тел.: +78634371634; кафедра АиРПУ; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Bobkov Ivan Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: antennadesign@outlook.com; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices; graduate student.

Yukhanov Yury Vladimirovich – e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; phone: +78634371634; the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices; dr. of eng. sc.; professor; head of the department.

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-214-232

А.А. Жук

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

Разработка и проектирование арсенид-галлиевых (GaAs) аналоговых функциональных узлов в современной микроэлектронике (операционных усилителях, выходных каскадах, и др.) находится на начальном этапе развития. Это связано с тем, что GaAs широкозонные полупроводники в настоящее время позиционируются преимущественно для сильноточной и сверхвысокочастотной электроники (например, применения в источниках питания, усилителях мощности т.п.). Для создания микромощной аналоговой компонентной базы, работающей в тяжелых условиях эксплуатации, например, при воздействии высоких температур ($+300...+350^{\circ}\text{C}$) и радиации, необходима разработка специальных GaAs схемотехнических решений, учитывающих параметры и ограничения соответствующих технологических процессов. Предлагается семейство выходных каскадов, защищенных 5 патентами РФ, для различных модификаций GaAs микромощных операционных усилителей, которые могут быть реализованы на совмещенном GaAs технологическом процессе, позволяющем создавать n-канальные полевые транзисторы с управляющим p-n переходом и GaAs биполярные p-n-p транзисторы. Рассматриваемые схемы выходных каскадов отличаются друг от друга величинами входных и выходных сопротивлений, статическим током потребления, схемотехникой цепей установления статического режима, частотным диапазоном, максимальными амплитудами положительного и отрицательного выходного напряжения и т.п. Приведены результаты сравнительного компьютерного моделирования статического режима, амплитудных и амплитудно-частотных характеристик выходных каскадов в среде LTspice. Предлагаемые схемотехнические решения рекомендуются для применения в GaAs микромощных операционных усилителях нового поколения, а также для использования в составе различных GaAs аналоговых микроэлектронных устройств, в т.ч. работающих в тяжелых условиях эксплуатации: воздействия проникающей радиации и низких температур. При мелкосерийном производстве предложенных выходных каскадов рекомендовано их выполнение на GaAs технологическом процессе, осваиваемом Минским Научно-Исследовательским Институтом Радиоматериалов (ОАО «МНИИРМ», г. Минск, Республика Беларусь), который допускает работу предлагаемых схем в условиях высоких температур (до $+300...+350^{\circ}\text{C}$), а также при воздействии проникающей радиации с поглощенной дозой гамма-квантов (до 1 Мрад) и потока нейтронов (до 10^{13} н/см²).

Операционные усилители; выходные каскады; совмещенные технологические процессы; арсенид-галлиевые полевые транзисторы; арсенид-галлиевые биполярные транзисторы.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>.