

11. Deng F.G., & Long G.L. Secure direct communication with a quantum one-time pad, *Physical Review A*, 2004, 69 (5), 052319.
12. Pljonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. Nonclassical attack on a quantum keydistribution system, *Entropy*, 2021, Vol. 23, No. 5. DOI: 10.3390/e23050509.
13. Zhao Y., Fung C.H.F., Qi B., Chen C., & Lo H.K. Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems, *Physical Review A*, 2008, 78 (4), 042333.
14. Makarov V., & Hjelme D.R. Faked states attack on quantum cryptosystems, *Journal of Modern Optics*, 2005, 52 (5), pp. 691-705.
15. Sabanov A.G., Shelupanov A.A. Identifikatsiya i autentifikatsiya v tsifrovom mire [Identification and authentication in the digital world]. Moscow: Goryachaya Liniya–Telekom, 2022.
16. Kravtsov K.S. i dr. Sistema relyativistskoy kvantovoy kriptografii [The system of relativistic quantum cryptography], 2018.
17. Beals T.R., Sanders B.C. Distributed relay protocol for probabilistic information-theoretic security in a randomly-compromised network, *Information Theoretic Security: Third International Conference, ICITS 2008, Calgary, Canada, August 10-13, 2008. Proceedings 3*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 29-39.
18. Dianati M., Alléaume R. Architecture of the Secoqc quantum key distribution network, *2007 First International Conference on Quantum, Nano, and Micro Technologies (ICQNM'07)*. IEEE, 2007, pp. 13-13.
19. Barnett S.M., Phoenix S.J. D. Securing a quantum key distribution relay network using secret sharing, *2011 IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)*. IEEE, 2011, pp. 143-145.
20. Pozdnyakov A.M. Sposob peredachi soobshcheniya cherez vychislitel'nyuyu set' s primeneniem apparatury kvantovogo raspredeleniya klyuchey [Method for transmitting messages through a computing network using quantum key distribution equipment], 2019.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

Плѐнкин Антон Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: pljonkin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89054592158; кафедра ИБТКС; к.т.н.; доцент.

Pljonkin Anton Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: pljonkin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79054592158; the Department of Information Security of Telecommunication Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-260-270

А.В. Геворкян, В.С. Савостин

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ РЕШЁТКИ АНТЕНН ВИВАЛЬДИ С ТЕМ-РУПОРОМ

Приведены конструкции и характеристики антенных решёток на основе антиподного излучателя Вивальди. Исследуются антенные решётки с ТЕМ-рупорами линейного и эллиптического профиля. Проведена оптимизация параметров рупоров. Характеристики исследовались в диапазоне частот от 4 до 12 ГГц. Антенная решётка с ТЕМ-рупором линейного профиля имеет лучший КСВН в диапазоне от 4 до 5 ГГц (для крайних излучателей максимум равен 4,75, а для остальных – 3,33). Рабочая полоса частот антенной решётки находится в диапазоне от 4,90 до 12,00 ГГц (коэффициент перекрытия $k_n=2,45$). Частотная характеристика реализованного коэффициента усиления (КУ) имеет провалы. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля с узким основанием имеет минимальную рабочую полосу частот (от 7,06 до 12,00 ГГц ($k_n=1,70$)) и плавную характеристику реализованного КУ. Антенная решётка с увеличенной шириной основания ТЕМ-рупора эллиптического профиля имеет лучший КСВН в диапазоне от 5,3 до 12,0 ГГц (для крайних излучателей максимум равен 2,51, а для остальных – 2,15), но характеристика реализованного КУ плавная только до 9 ГГц. Рабочая полоса частот антенной решётки находится в диапазоне от 4,84 до 12,00 ГГц ($k_n=2,48$). Лучшие характеристики у антенной решётки с ТЕМ-рупором эллиптического профиля с расширенным основанием и увеличенной высотой. Увеличение высоты рупора приводит к увеличению значений реализованного КУ на частотах более 9,25 ГГц, где были провалы. Рабочая полоса частот находится в диапазоне от 4,72 до 12,00 ГГц

($k_n=2,54$). В рабочей полосе частот значения реализованного КУ находятся в диапазоне от 11,9 до 20,6 дБ. Таким образом, выбором формы и параметров рупора можно улучшить частотные характеристики антенной решётки.

Антенная решётка; антиподная антенна Вивальди; TEM-рупор эллиптического профиля; сверхширокополосность; КСВН; реализованный коэффициент усиления.

A.V. Gevorkyan, V.S. Savostin

ULTRA-WIDEBAND VIVALDI ANTENNA ARRAYS WITH TEM HORN

Presents the designs and characteristics of antenna array based on the antipodal Vivaldi element. Antenna arrays with TEM horns of linear and elliptical profile are studied. The parameters of the horns were optimized. The characteristics were studied in the frequency range from 4 to 12 GHz. The antenna array with a linear profile TEM horn has the best VSWR in the range from 4 to 5 GHz (for the edge elements the maximum is 4,75, and 3,33 for others). The operating frequency band of the antenna array is in the range from 4,90 to 12,00 GHz (overlap coefficient $k_n=2,45$). The frequency characteristics of the realized gain has dips. The antenna array with a TEM horn of an elliptical profile with a narrow base has a minimum operating frequency band (from 7,06 to 12,00 GHz ($k_n=1,70$)) and a smooth characteristic of the realized gain. Antenna array with an increased base width of the TEM horn of an elliptical profile has the best VSWR in the range from 5,3 to 12,0 GHz (for edge elements, the maximum is 2,51, and 2,15 for others), but the characteristics of the realized gain is smooth only up to 9 GHz. The operating frequency band of the antenna array is in the range from 4,84 to 12,00 GHz ($k_n=2,48$). The best characteristics has the antenna array with a TEM horn elliptical profile with an expanded base and increased height. An increase in the height of the horn leads to an increase in the values of the realized gain at frequencies above 9,25 GHz, where there were dips. The operating frequency band ranges from 4,72 to 12,00 GHz ($k_n=2,54$). In the operating frequency band, the values of the realized gain are in the range from 11,9 to 20,6 dB. Thus, by choosing the shape and parameters of the horn, the frequency characteristics of the antenna array can be improved.

Antenna array; antipodal Vivaldi antenna; elliptical profile TEM-horn; ultra-wideband; VSWR; realized gain.

Введение. Широкое применение сверхширокополосных (СШП) антенн вызвано активным развитием и внедрением сверхширокополосных систем. Эти антенны обеспечивают требуемые характеристики в сверхшироком диапазоне рабочих частот (коэффициент перекрытия таких антенн $k_n = \frac{f_{max}}{f_{min}} \geq 2$, где f_{max} и f_{min} – максимальная и минимальная рабочая частота антенны по заданному уровню КСВН).

Одной из самых широко используемых разновидностей СШП антенн [1] является антенна Вивальди. Широкое применение антенн Вивальди вызвано их преимуществами [2] по сравнению с другими типами СШП антенн: сверхширокополосность, большой коэффициент усиления (КУ) одиночных антенн и простота изготовления. Такая антенна впервые предложена Гибсоном [3] в 1979 году и представляла собой проводник с расширяющейся щелью, который расположен на диэлектрической подложке.

Изначально предложена компланарная конструкция антенны Вивальди. Такая антенна имеет большой недостаток – её полоса рабочих частот ограничена структурой линии питания. Для расширения рабочей полосы частот, Газитом [4] в 1988 году предложен антиподный тип антенны Вивальди. В ней излучающие проводники находятся на противоположных сторонах подложки.

Для улучшения кросс-поляризационных свойств, в 1993 году Лэнгли [5] предложена новая разновидность антенны Вивальди – балансная антиподная антенна Вивальди. Антенна имеет две подложки и три проводника (два внешних проводника подключаются к оплётке коаксиального кабеля, а средний проводник подключается к жиле).

В дальнейшем, интерес к антенне Вивальди вырос, и изменение её конструкции продолжается до сих пор [6–8].

Данная статья посвящена разработке линейных 10-элементных эквидистантных антенных решёток Вивальди. Конструкция используемого антиподного излучателя Вивальди основана на одиночной антенне [9], которая оптимизирована для работы в составе

антенной решётки [10]. Основной особенностью разработанных антенных решёток Вивальди является их совмещение с TEM-рупором линейного [11–17] и эллиптического [18–22] профиля.

Конструкция излучателя. На рис. 1 приведена конструкция антиподного излучателя Вивальди, смоделированного в HFSS [23]. Он состоит из двух проводников, расположенных на диэлектрической подложке из материала FR-4. Питание обеспечивает 50-Омный коаксиальный кабель. Параметры излучателя приведены в таблице.

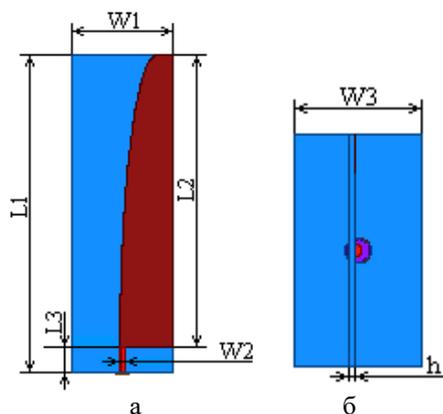


Рис. 1. Конструкция излучателя Вивальди: а – вид спереди, б – вид сверху

Таблица

Параметры антиподного излучателя Вивальди

Конструктивный параметр	Значение параметра, мм
Ширина антенны – $W1$	18,5
Длина антенны – $L1$	58
Длина проводников – $L2$	53,5
Длина линии питания – $L3$	4,5
Ширина линии питания – $W2$	0,4
Ширина экрана – $W3$	10
Толщина подложки – h	1

Конструкции антенных решёток

А. Антенная решётка с TEM-рупором линейного профиля. Первая конструкция антенной решётки приведена на рис. 2. Она представляет собой линейную 10-элементную эквидистантную антенную решётку с параллельным питанием. Антенная решётка совмещена с TEM-рупором линейного профиля. Параметры рупора: ширина основания – 10 мм, высота – 70 мм и ширина раскрытия – 90 мм.

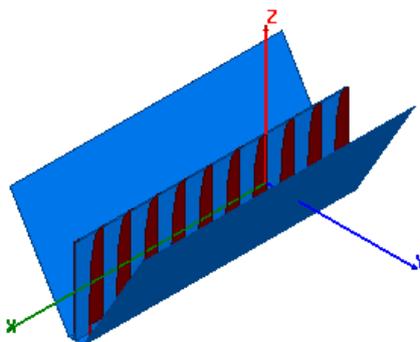


Рис. 2. Конструкция антенной решётки

Б. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля. Особенностью следующей антенной решётки является изменение формы рупора – ТЕМ-рупор имеет эллиптический профиль. На рис. 3 приведена конструкция антенной решётки. Параметры ТЕМ-рупора: ширина основания – 10 мм, высота – 75 мм и ширина раскрыва – 60 мм.

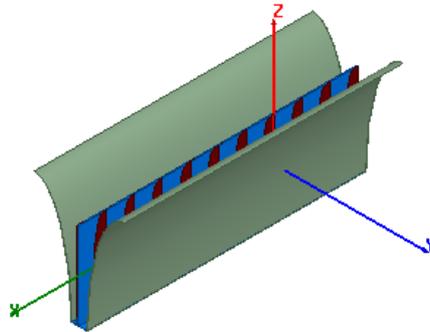


Рис. 3. Конструкция антенной решётки

В. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля и расширенным основанием. Для уменьшения влияния стенок рупора на согласование антенн с линией питания, ширина основания рупора была увеличена до 30 мм (ширина раскрыва – 80 мм). Полученная конструкция приведена на рис. 4.

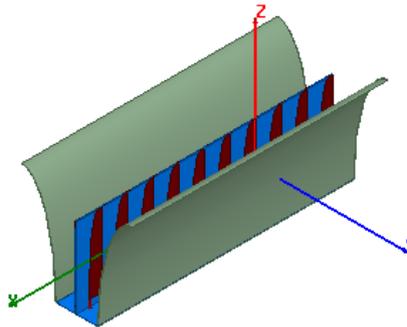


Рис. 4. Конструкция антенной решётки

Г. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля, расширенным основанием и увеличенной высотой. Для улучшения частотной характеристики реализованного КУ, высота стенок рупора была увеличена до 85 мм. Остальные параметры остались без изменений. Полученная конструкция приведена на рис. 5

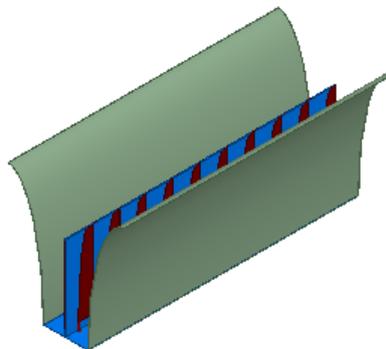


Рис. 5. Конструкция антенной решётки

Результаты моделирования характеристик антенных решёток

А. Антенная решётка с ТЕМ-рупором линейного профиля. На рис. 6 приведены частотные характеристики КСВН, реализованного КУ и КПД антенной решётки. Здесь и далее, на рисунках с КСВН, штриховые и пунктирные линии соответствуют крайним (первому и последнему) излучателям антенной решётки. Для них максимальное значение КСВН принимается равным 4, а для остальных – 3.

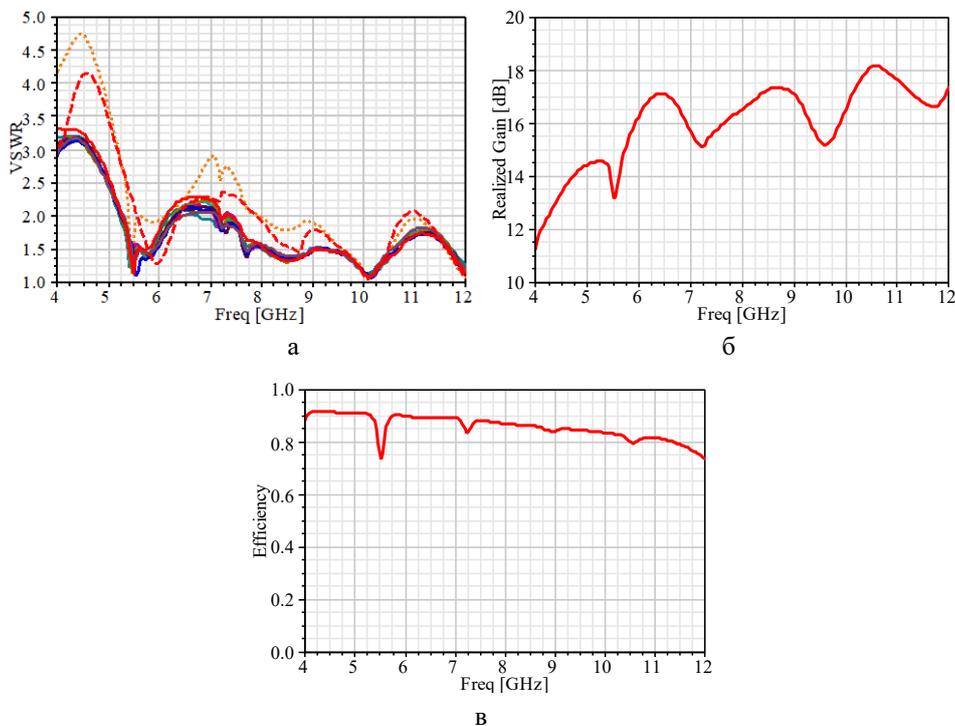


Рис. 6. Частотные характеристики: а – КСВН, б – реализованного КУ, в – КПД

Частотная характеристика КСВН показывает, что рабочая полоса частот антенной решётки находится в диапазоне от 4,90 до 12,00 ГГц ($k_n=2,45$). В диапазоне от 4 до 5 ГГц эта антенная решётка имеет лучший КСВН.

Частотная характеристика реализованного КУ ($\Theta=0^\circ$) показывает, что его значения находятся в диапазоне от 13,2 до 18,2 дБ (рис. 6,б). Характеристика имеет провалы. Для понимания причины провалов в частотной характеристике, на рис. 7 приведены диаграммы направленности (ДН) для Е- (—) и Н-плоскостей (---). Из рисунка видно, что провалы вызваны расширением ДН (из-за того, что распределение поля в раскрытие рупора не является равномерным). Поэтому, для улучшения распределения поля, в следующей конструкции ТЕМ-рупора линейного профиля был заменен на ТЕМ-рупор эллиптического профиля.

Частотная характеристика КПД (см. рис. 6,в) показывает, что он превышает 73%. Уменьшение КПД с ростом частоты связано с ростом тепловых потерь в диэлектрической подложке.

Б. Антенная решётка с ТЕМ рупором эллиптического профиля. На рис. 8 приведены частотные характеристики КСВН, реализованного КУ и КПД антенной решётки.

Частотная характеристика КСВН (см. рис. 8,а) показывает, что ТЕМ-рупор эллиптического профиля вызывает сильное увеличение КСВН на низких частотах. На высоких частотах значения КСВН уменьшаются. Рабочая полоса частот находится в диапазоне от 7,06 до 12,00 ГГц ($k_n=1,70$). Изменение значений КСВН связано с близким расположением нижней части стенок рупора к излучателям.

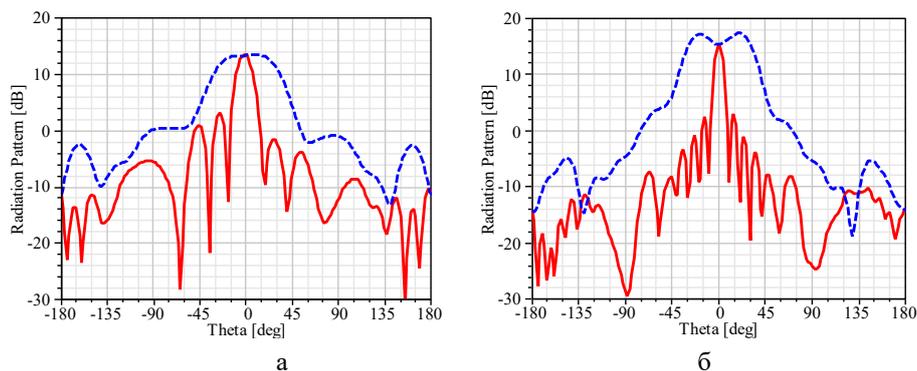


Рис. 7. ДН антенной решётки на частотах: а – 5,56 ГГц, б – 9,60 ГГц

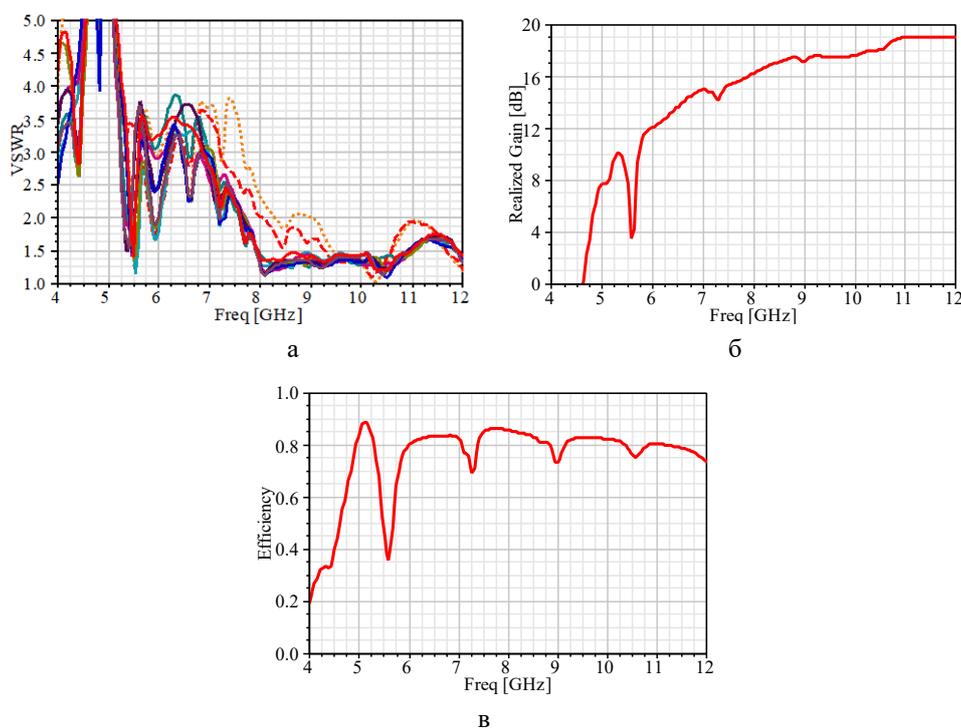


Рис. 8. Частотные характеристики: а – КСВН, б – реализованного КУ, в – КПД

Сравнение рис. 6,б и 8,б показывает, что на высоких частотах происходит увеличение реализованного КУ (в рабочей полосе его значения находятся в диапазоне от 14,2 до 19,0 дБ). Характеристика имеет плавный вид. Однако в районе частоты 5,6 ГГц имеется большой провал. Из рис. 9 видно, что на этой частоте, в направлении $\Theta=0^\circ$, ДН имеет провал, а два её максимума отличаются по значению.

Из частотной характеристики КПД (см. рис. 8,в) видно, что провалы также увеличились. Наибольший из них наблюдается на частоте 5,6 ГГц.

Провалы в частотных характеристиках реализованного КУ и КПД связаны с резонансными явлениями, свойственные рассматриваемого излучателю, и параметры рупора влияют на них.

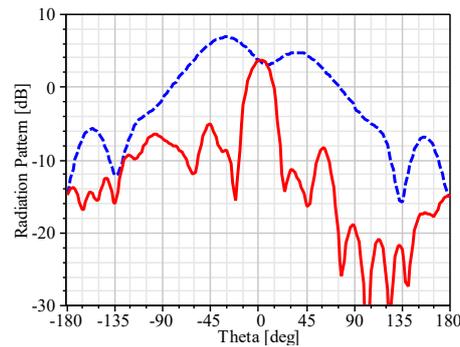


Рис. 9. ДН антенной решётки на частоте 5,6 ГГц

В. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля и расширенным основанием. На рис. 10 приведены частотные характеристики КСВН, реализованного КУ и КПД антенной решётки. Видно, что увеличение ширины основания рупора улучшило частотные характеристики КСВН и КПД. Рабочая полоса частот антенной решётки находится в диапазоне от 4,84 до 12,00 ГГц ($k_n=2,48$). Из всех антенных решёток, она имеет лучший КСВН в диапазоне от 5,3 до 12 ГГц (для крайних излучателей максимум равен 2,51, а для остальных – 2,15). В рабочей полосе частот значения КПД превышают 78%.

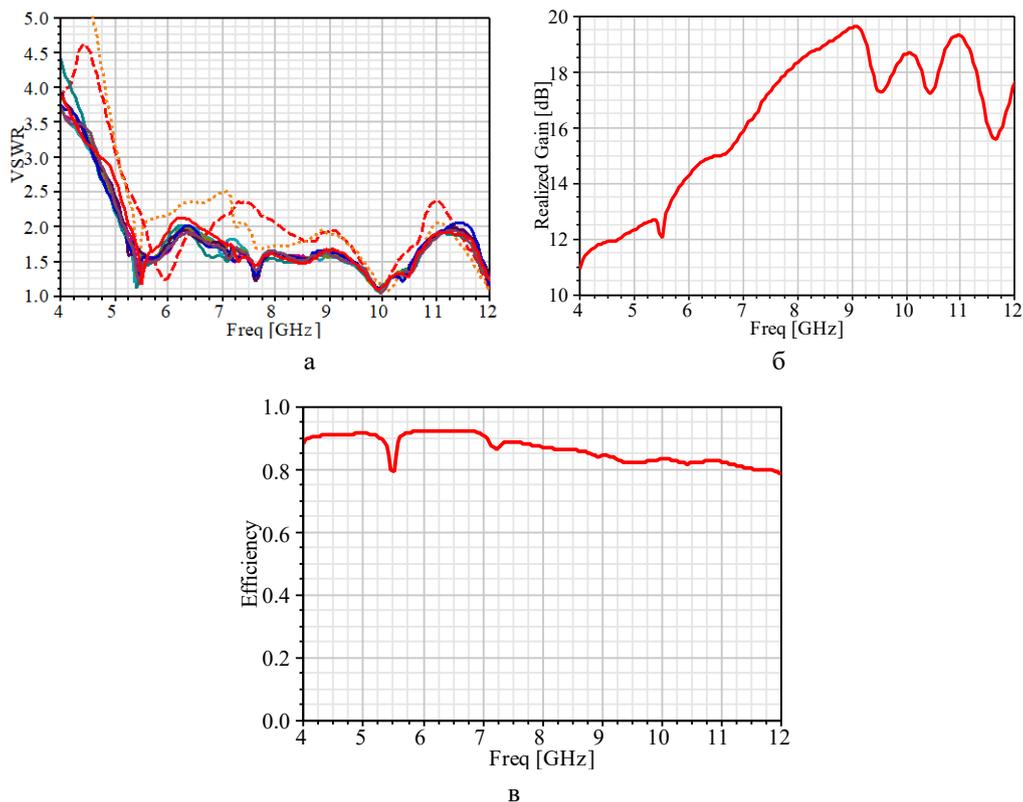


Рис. 10. Частотные характеристики: а – КСВН, б – реализованного КУ, в – КПД

Расширение основания рупора, как следует из сравнения рис. 8,б и 10,б приводит к существенному уменьшению провала частотной характеристики реализованного КУ в районе 5,5–5,6 ГГц и увеличению его значений на частотах до 9 ГГц. Они находятся в

диапазоне от 12,1 до 19,7 дБ. В остальной части исследованного диапазона частот характеристика ухудшается и имеет провалы. Причина ухудшений, как и в рассмотренных выше случаях, заключается в расширении ДН в Н-плоскости.

Г. Антенная решётка с ТЕМ-рупором эллиптического профиля, расширенным основанием и увеличенной высотой. На рис. 11 приведены частотные характеристики КСВН, реализованного КУ и КПД.

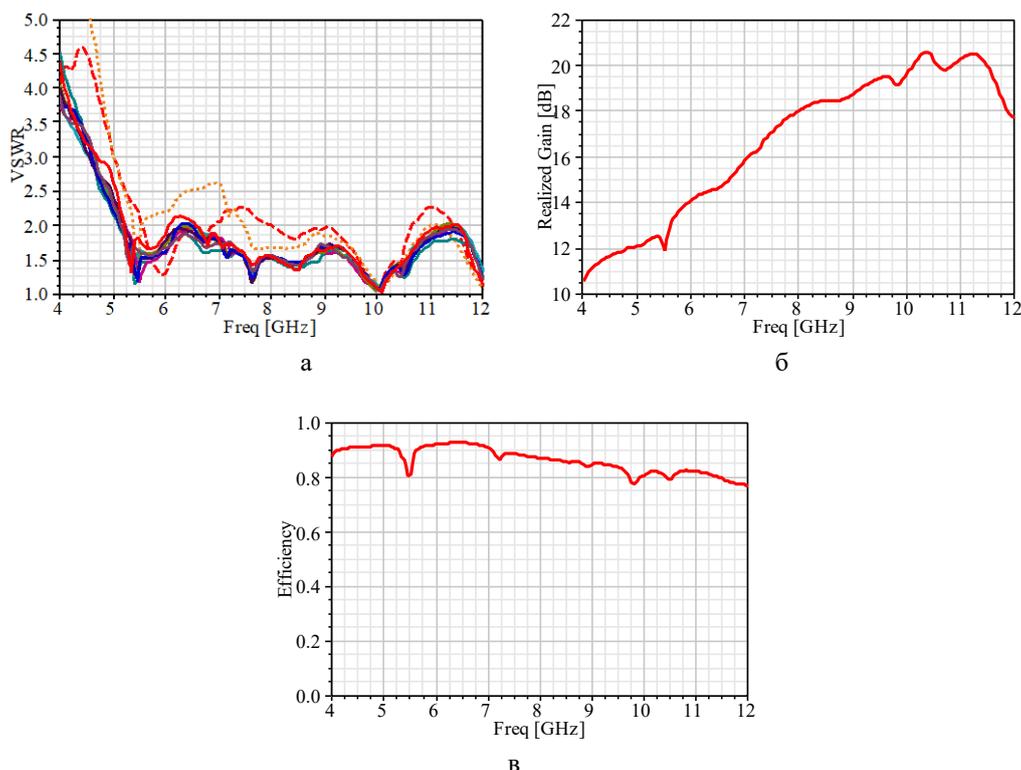


Рис. 11. Частотные характеристики: а – КСВН, б – реализованного КУ, в – КПД

Частотная характеристика КСВН (см. рис. 11,а) показывает, что его значение у крайних излучателей превышает 4 в диапазоне 4 – 4,8 ГГц. КСВН остальных излучателей не превышает 3, начиная с частоты 4,72 ГГц. Следовательно, рабочая полоса частот антенной решётки находится в диапазоне от 4,72 до 12,00 ГГц ($k_n=2,54$).

Рис. 11,б показывает, что увеличение высоты рупора приводит к увеличению на 0,8–3,8 дБ значений реализованного КУ на частотах более 9,25 ГГц и провалы в характеристике уменьшились. На остальных частотах он не изменяется или уменьшается (максимум – 0,5–0,9 дБ в диапазоне 8,5–9,2 ГГц). Улучшение связано с тем, что распределение поля в раскрыве рупора становится равномернее. В рабочей полосе частот значения реализованного КУ находятся в диапазоне от 11,9 до 20,6 дБ, а значения КПД (см. рис. 11,в) превышают 76%.

На рис. 12 приведены ДН в Е- (—) и Н-плоскостях (---). Из рисунка видно, что на частоте 12 ГГц в Н-плоскости ДН шире, чем на меньшей частоте 9,8 ГГц. Поэтому провал в районе частоты 12 ГГц остается. Это может быть связано и с тем, что на этой частоте электрическая ширина излучателя равна $0,74 \lambda$.

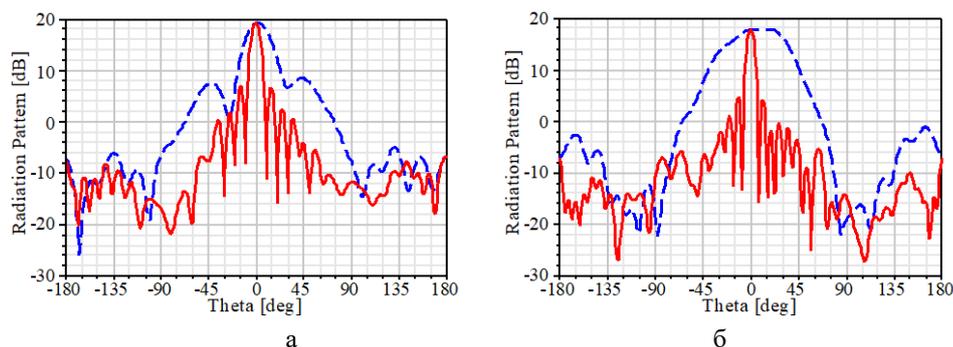


Рис. 12. ДН антенной решётки на частотах: а – 9,8 ГГц, б – 12,0 ГГц

Заключение. Результаты исследования показывают, что выбором формы и параметров рупора можно улучшить частотные характеристики антенной решётки. Рабочая полоса частот первого варианта конструкции антенной решётки с ТЕМ-рупором линейного профиля находится в диапазоне от 4,90 до 12,00 ГГц (коэффициент перекрытия $k_{\text{п}}=2,45$), но частотная характеристика реализованного КУ имеет провалы, а его значения находятся в диапазоне от 13,2 до 18,2 дБ. Последняя конструкция является лучшей с точки зрения улучшения характеристик в пределах диапазона рабочих частот. Она имеет большую ширину рабочей полосы частот (в диапазоне от 4,72 до 12,00 ГГц ($k_{\text{п}}=2,54$)), частотная характеристика реализованного КУ имеет плавный вид, а его значения находятся в диапазоне от 11,9 до 20,6 дБ. Особенности последней конструкции: ТЕМ-рупор имеет эллиптический профиль, увеличенную ширину основания (30 мм) и высоту (85 мм).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект № 22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>) в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, г. Таганрог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tayebi M., Dastranj A.A., Alighanbari A. Ultra Wide Band Antipodal Vivaldi Antenna with Tapered Triangular Corrugated Edges // IEEE 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). – 2019. – P. 1637-1642. – DOI: 10.1109/IranianCEE.2019.8786722.
2. Tangwachirapan S., Thaiwirot W., Akkaraekthalin P. Design of Ultra-Wideband Antipodal Vivaldi Antenna with Square Dielectric Lens for Microwave Imaging Applications // IEEE 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON). – 2019. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/iEECON45304.2019.8939032.
3. Gibson P.J. The Vivaldi Aerial // IEEE 9th European Microwave Conference. – 1979. – P. 101-105. – DOI: 10.1109/EUMA.1979.332681.
4. Gazit E. Improved Design of the Vivaldi Antenna. Microwaves // IEE Proceedings. – 1988. – Vol. 135. – Pt. H. N. 2. – P. 89-92. – DOI: 10.1049/ip-h-2.1988.0020.
5. Langley J.D.S., Hall P.S., Newham P. Novel ultrawide-bandwidth Vivaldi antenna and low crosspolarisation // Electronics Letters. – 1993. – Vol. 29, Issue 23. – P. 2004-2005. – DOI: 10.1049/el:19931336.
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. – Apr. 2018. – Vol. 66, No. 4. – P. 1818-1826. – DOI: 10.1109/TAP.2018.2809476.
7. Ning Y., Ling L., Bao F., Li Z. An Ultra-wideband Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – 2018. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8563335.
8. Minjie Guo et al. High-gain antipodal Vivaldi antenna with metamaterial covers // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2019. – Vol. 13, Iss. 15. – DOI: 10.1049/iet-map.2019.0449.
9. Kumar R., Behera B. R., Suraj P. A Modified Leaf Shaped Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications // 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP). – 2018. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/INCAP.2018.8770788.

10. *Suo Y., Qi F., Li W.* Design of ultra-wideband TEM horn antenna for life detection // 2021 IEEE International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP). – 2021. – P. 1–2. – DOI: 10.23919/ISAP47258.2021.9614515.
11. *Wang D., Zheng S., Deng F., Hou D.* Analysis on the time-domain transfer characteristics of UWB horn antenna // IEEE 5th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – 2013. – P. 351-354. – DOI: 10.1109/MAPE.2013.6689819.
12. *Wang Y., Chen Y.-G.* Research on the impact of TEM horn antenna's structural parameter pulse waveform // 2011 IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering. – 2011. – P. 3155-3138. – DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057399.
13. *Zalabsky T., Bezousek P.* TEM horn antenna for high energy emission // IEEE 23rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). – 2013. – P. 92-95. – DOI: 10.1109/RadioElek.2013.6530898.
14. *Lin S., Yu S., Jiao J.-L., Yang C.-T.* Simulation and analysis of an ultra-wideband TEM horn antenna with edge // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – 2017. – P. 1-2. – DOI: 10.1109/ISANP.2017.8228996.
15. *Schoeman K., Meyer P., D.I.L. de Villiers.* Exponential TEM horn with a convex triangular arc // 2013 IEEE Africon. – 2013. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/AFRCON.2013.6757614.
16. *Калошин В.А., Нгуен К.З.* Исследование характеристик СШП плоских двумерно-периодических решеток TEM рупоров // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 5. – <http://jre.cplire.ru/jre/may17/14/text.pdf>.
17. *Калошин В.А., Ле Н.Т., Фролова Е.В.* Сверхдиапазонная цилиндрическая антенная решетка TEM рупоров // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 4. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.2>.
18. *Suo Y., Qi F., Li W.* Design of exponential gradient TEM horn antenna for ground penetrating radar // 2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – 2021. – P. 1-2. – DOI: 10.23919/ISAP47258.2021.9614604.
19. *Li Z.-H., Ma J., Wu J., Huang J.-J., Lu Y. -H., Peng L.* Miniaturization Design of TEM Horn Antenna for Ground-Penetrating Radar // 2023 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – 2023. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554597.
20. *Ameri A.A. H, Kompa G., Bangert A.* Study about TEM horn size reduction of ultrawideband radar application // 2011 IEEE German Microwave Conference. – 2011. – P. 1-4.
21. *Rojhani N., Pieraccini M., Golazari S.S.* A Compact TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar // 2018 IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI). – 2018. – P. 1641-1645. – DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554597.
22. *Savostin V.S., Gevorkyan A.V.* Ultra-Wideband 10-Element Antipodal Vivaldi Antenna Array with Metallic Insert // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW. – 2023. – P. 420-423. – DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202131.
23. High Frequency Structural Simulator (HFSS). ANSYS. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.

REFERENCES

1. *Tayebi M., Dastranj A.A., Alighanbari A.* Ultra Wide Band Antipodal Vivaldi Antenna with Tapered Triangular Corrugated Edges, *IEEE 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2019, pp. 1637-1642. DOI: 10.1109/IranianCEE.2019.8786722.
2. *Tangwachirapan S., Thaiwirot W., Akkaraekthalin P.* Design of Ultra-Wideband Antipodal Vivaldi Antenna with Square Dielectric Lens for Microwave Imaging Applications, *IEEE 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2019, pp. 1-4. DOI: 10.1109/iEECON45304.2019.8939032.
3. *Gibson P.J.* The Vivaldi Aerial, *IEEE 9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101-105. DOI: 10.1109/EUMA.1979.332681.
4. *Gazit E.* Improved Design of the Vivaldi Antenna. *Microwaves, IEE Proceedings*, 1988, Vol. 135, Pt. H. N. 2, pp. 89-92. DOI: 10.1049/ip-h-2.1988.0020.
5. *Langley J.D.S., Hall P.S., Newham P.* Novel ultrawide-bandwidth Vivaldi antenna and low crosspolarisation, *Electronics Letters*, 1993, Vol. 29, Issue 23, pp. 2004-2005. DOI: 10.1049/el:19931336.
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*, Apr. 2018, Vol. 66, No. 4, pp. 1818-1826. DOI: 10.1109/TAP.2018.2809476.

7. Ning Y., Ling L., Bao F., Li Z. An Ultra-wideband Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna, *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2018, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8563335.
8. Minjie Guo et al. High-gain antipodal Vivaldi antenna with metamaterial covers, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, Vol. 13, Iss. 15. DOI: 10.1049/iet-map.2019.0449.
9. Kumar R., Behera B. R., Suraj P. A Modified Leaf Shaped Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications, *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109/INCAP.2018.8770788.
10. Suo Y., Qi F., Li W. Design of ultra-wideband TEM horn antenna for life detection, *2021 IEEE International Symposium on Antenna and Propagation (ISAP)*, 2021, pp. 1–2. DOI: 10.23919/ISAP47258.2021.9614515.
11. Wang D., Zheng S., Deng F., Hou D. Analysis on the time-domain transfer characteristics of UWB horn antenna, *IEEE 5th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2013, pp. 351-354. DOI: 10.1109/MAPE.2013.6689819.
12. Wang Y., Chen Y.-G. Research on the impact of TEM horn antenna's structural parameter pulse waveform, *2011 IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011, pp. 3155-3138. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057399.
13. Zalabsky T., Bezousek P. TEM horn antenna for high energy emission, *IEEE 23rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2013, pp. 92-95. DOI: 10.1109/RadioElek.2013.6530898.
14. Lin S., Yu S., Jiao J.-L., Yang C.-T. Simulation and analysis of an ultra-wideband TEM horn antenna with edge, *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2017, pp. 1-2. DOI: 10.1109/ISANP.2017.8228996.
15. Schoeman K., Meyer P., D.I.L. de Villiers. Exponential TEM horn with a convex triangular arc, *2013 IEEE Africon*, 2013, pp. 1-5. DOI: 10.1109/AFRCON.2013.6757614.
16. Kaloshin V.A., Nguen K.Z. Issledovanie kharakteristik SSHP ploskikh dvumerno-periodicheskikh reshetok TEM ruporov [Study of characteristics of UWB flat two-dimensional periodic arrays of TEM horns], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, No. 5. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/14/text.pdf>.
17. Kaloshin V.A., Le N.T., Frolova E.V. Sverkhdiapazonnaya tsilindricheskaya antennaya reshetka TEM ruporov [Ultra-range cylindrical antenna array of TEM horns], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2020, No. 4. Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.2>.
18. Suo Y., Qi F., Li W. Design of exponential gradient TEM horn antenna for ground penetrating radar, *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2021, pp. 1-2. DOI: 10.23919/ISAP47258.2021.9614604.
19. Li Z.-H., Ma J., Wu J., Huang J.-J., Lu Y. -H., Peng L. Miniaturization Design of TEM Horn Antenna for Ground-Penetrating Radar, *2023 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2023, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554597.
20. Ameri A.A. H, Kompa G., Bangert A. Study about TEM horn size reduction of ultrawideband radar application, *2011 IEEE German Microwave Conference*, 2011, pp. 1-4.
21. Rojhani N., Pieraccini M., Golazari S.S. A Compact TEM Horn Antenna for Ground Penetrating Radar, *2018 IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 2018, pp. 1641-1645. DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554597.
22. Savostin V.S., Gevorkyan A.V. Ultra-Wideband 10-Element Antipodal Vivaldi Antenna Array with Metallic Insert, *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW*, 2023, pp. 420-423. DOI: 10.1109/RSEMW58451.2023.10202131.
23. High Frequency Structural Simulator (HFSS). ANSYS. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.

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

Геворкян Армен Валерьевич – Южный федеральный университет; e-mail: gevorkyan.scp@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра АиРПУ; к.т.н.; доцент.

Савостин Владислав Сергеевич – e-mail: savostin@sfedu.ru; тел.: +7863437173; кафедра АиРПУ; аспирант.

Gevorkyan Armen Valerievich – Southern Federal University; e-mail: gevorkyan.scp@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices; cand. of eng. sc.; associate professor.

Savostin Vladislav Sergeevich – e-mail: savostin@sfedu.ru; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices; postgraduate student.