

Р.Э. Косак, А.В. Геворкян

**КОМПАКТНЫЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ВИВАЛЬДИ
КАРДИОИДНОЙ ФОРМЫ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПЕДАНСНЫМИ
ВСТАВКАМИ**

Представлена конструкция излучателя Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными импедансными вставками по краям его металлизации. Исследовано влияние импедансных вставок от их расположения и параметров на характеристики излучателя. Приведены частотные характеристики коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), коэффициента усиления (КУ), коэффициента полезного действия (КПД) и уровня кроссовой поляризации излучателя без импедансных вставок и с ними. Разработанный излучатель является электрически компактным (электрическая высота на верхней рабочей частоте равна $0,740 \lambda$, а на нижней – $0,127 \lambda$) и сверхширокополосным (СШП) с коэффициентом перекрытия (КП) $5,809:1$ в рабочей полосе частот $127,3\text{--}739,5$ МГц. Ширина импедансных вставок изменялась от $5,0$ мм до $25,5$ мм. При этом, увеличение ширины приводит к небольшому расширению рабочей полосы частот и увеличению КП. А вот КУ практически не изменяется, так как излучатель является слабонаправленным и его КУ зависит в основном от размера апертуры. Численные значения КПД и уровня кроссовой поляризации при увеличении ширины вставок также практически не изменяются. Оптимальное значение ширины импедансных вставок равно $25,5$ мм. Высота импедансных вставок отсчитывалась от верхней части излучателя. Рассмотрено влияние импедансных вставок высотой $60, 100, 140, 145$ и 160 мм. Определено, что с увеличением их высоты ширина рабочей полосы увеличивается, однако средний уровень КСВН в полосе частот $180\text{--}280$ МГц плавно растет. КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации при увеличении высоты вставок также практически не изменяются. Оптимальное значение высоты импедансных вставок равно $25,5$ мм. Таким образом, введение импедансных вставок позволяет добиться расширения рабочей полосы частот излучателя.

Компактный излучатель Вивальди; коэффициент стоячей волны по напряжению; коэффициент усиления; коэффициент полезного действия; сверхширокая полоса частот; фазированная антенная решетка; импедансные вставки.

R.E. Kosak, A.V. Gevorkyan

**COMPACT ULTRA-WIDEBAND CARDIOID VIVALDI RADIATOR WITH
RECTANGULAR IMPEDANCE INSERTS**

The paper presents the design of the cardioid-shaped Vivaldi radiator with rectangular impedance inserts along the edges of its metallization. The influence of impedance inserts, their location, and parameters on the characteristics of the radiator is investigated. The frequency characteristics of the voltage standing wave ratio (VSWR), realized gain, efficiency, and cross-polarization level of the radiator without and with impedance inserts are given. The developed radiator is electrically compact (electrical height at the upper operating frequency is equal to 0.740λ , and at the lower operating frequency is equal to 0.127λ) and ultra-wideband with an overlap ratio (OR) of $5.809:1$ in the operating frequency band $127.3\text{--}739.5$ MHz. The width of the impedance inserts varied from 5.0 mm to 25.5 mm towards the tapered slot. At the same time, an increase width leads to a slight expansion of the operating frequency band and an increase of OR. But the realized gain practically does not change since the radiator is weakly directional and its realized gain depends mainly on the size of the aperture. The numerical values of efficiency and cross-polarization characteristics also remained virtually unchanged with increasing insert width. The optimal width of the impedance inserts is equal to 25.5 mm. The height of the impedance inserts was measured from the top of the radiator. The influence of impedance inserts with a height of $60, 100, 140, 145,$ and 160 mm is considered. It has been determined that as their height increases, the width of the operating band increases, but the average VSWR level in the frequency band $180\text{--}280$ MHz gradually increases. The realized gain, efficiency, and cross-polarization level also remain virtually unchanged with the increasing height of the inserts. The optimal height of the impedance inserts is equal to 25.5 mm. Thus, the introduction of impedance inserts makes it possible to expand the operating frequency band of the radiator.

Compact Vivaldi radiator; VSWR; realized gain; efficiency; UWB; phased array antenna; impedance inserts.

Введение. На сегодняшний день существует много задач по разработке излучателей фазированных антенных решеток (ФАР), которые применяются в различных сферах: радиосвязь, радиолокация, радионавигация, радиоэлектронная борьба и т.д. Важно, чтобы ФАР имела требуемые характеристики излучения в широкой или сверхширокой полосе частот [1].

Существует несколько определений широкополосных и СШП сигналов [2]. Определим, что в данной работе сверхширокополосными будем считать ФАР с шириной рабочей полосы частот более октавы, т.е. ФАР, у которых верхняя рабочая частота более чем в 2 раза превосходит нижнюю ($KП \geq 2$) [3].

ФАР состоят из излучателей, которые должны обладать малой массой, компактным размером, быть недорогими и простыми в изготовлении и транспортировке. Всеми перечисленными ранее достоинствами обладают излучатели на основе антенны Вивальди [4].

Антенна Вивальди, впервые представленная Петером Гибсоном в 1979 году [5], с тех пор получила множество модификаций. На характеристики излучения этой антенны большую роль оказывают особенности ее конструкции: форма проводящих слоев, использование различных вырезов и вставок, которые являются импедансными структурами и т.д. Правильным выбором формы лепестков антенны можно добиться решения поставленных задач. Известно множество примеров построения различных форм излучателей Вивальди: скругленная, Чебышевская, эллиптическая и т.д. [6], в том числе конформные [7–8]. И каждая из этих форм имеет свои преимущества и недостатки.

К примеру, СШП антиподная антенна Вивальди кардиоидной формы была продемонстрирована в [9]. Однако антенна имела значительную электрическую высоту: на верхней рабочей частоте 15,000 ГГц равную $13,5 \lambda$, а на нижней рабочей частоте 3,658 ГГц равную $3,3 \lambda$.

О влиянии вставок различной формы, расположенных на краях излучателя Вивальди, на его характеристики излучения известно немало. К примеру, добавление прямоугольных вставок по краям излучателя позволяет расширить рабочую полосу частот [10], а введение сплошной пластины на кромке позволяет также улучшить средний уровень согласования [11].

Согласно [12], характеристики излучения излучателя в составе решетке зависят от параметров самого элемента. При этом, для их улучшения (в том числе для улучшения согласования) можно использовать различные импедансные поверхности. Так, в [13] для улучшения уровня согласования и полосы рабочих частот используются согласующие элементы в виде прямоугольных металлических пластин, расположенных по краям излучателя. Важную роль играет компактность излучателя, что позволяет сэкономить на материале, упростить производство и транспортировку, а также уменьшить вес ФАР. Миниатюризации антенн Вивальди и излучателей на их основе можно добиться благодаря изменению формы их лепестков [14].

В [15] импедансные вставки используются для увеличения усиления и улучшения ДН. Также импедансные вставки позволяют расширить рабочую полосу частот, улучшить согласование, КУ и направленность антенны Вивальди [16–17].

Целью данной работы было исследование эффективности применения прямоугольных импедансных вставок по краям лепестков для расширения рабочей полосы частот компактного излучателя Вивальди кардиоидной формы.

Конструкция и характеристики излучения излучателя без импедансных вставок. В данной работе рассматривается излучатель Вивальди кардиоидной формы (рис. 1), структура которого основана на антенне из [9].

Излучатель выполнен на диэлектрической подложке «RT/duroid 5880» с относительной диэлектрической проницаемостью 2,2. Его габаритные размеры: толщина – 0,9 мм, ширина – 150,0 мм и высота – 300,0 мм. Излучатель располагается на экране размером 100 мм × 150 мм, который находится в плоскости XOY. Для построения кромки излучателя предложена следующая формула кардиоиды:

$$\begin{cases} x(t) = 0, \\ y(t) = \frac{0.5}{7} \cdot \cos(t), \\ z(t) = \frac{1}{9} \cdot (\sin(t) + \sqrt{|\cos(t)|}). \end{cases}$$

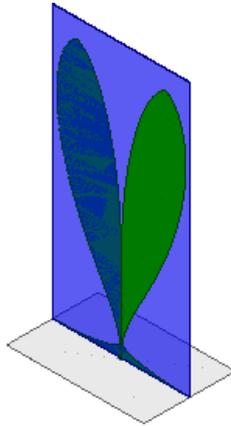


Рис. 1. Конструкция исходного излучателя кардиоидной формы

Излучатель рассчитывался в составе бесконечной антенной решетки с использованием периодических граничных условий на боковых поверхностях ячейки типа Master-Slave [18] в специализированном программном обеспечении электродинамического проектирования HFSS [19–20].

На рис. 2 приведены характеристики излучения КСВН, КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации для излучателя, представленного на рис. 1.

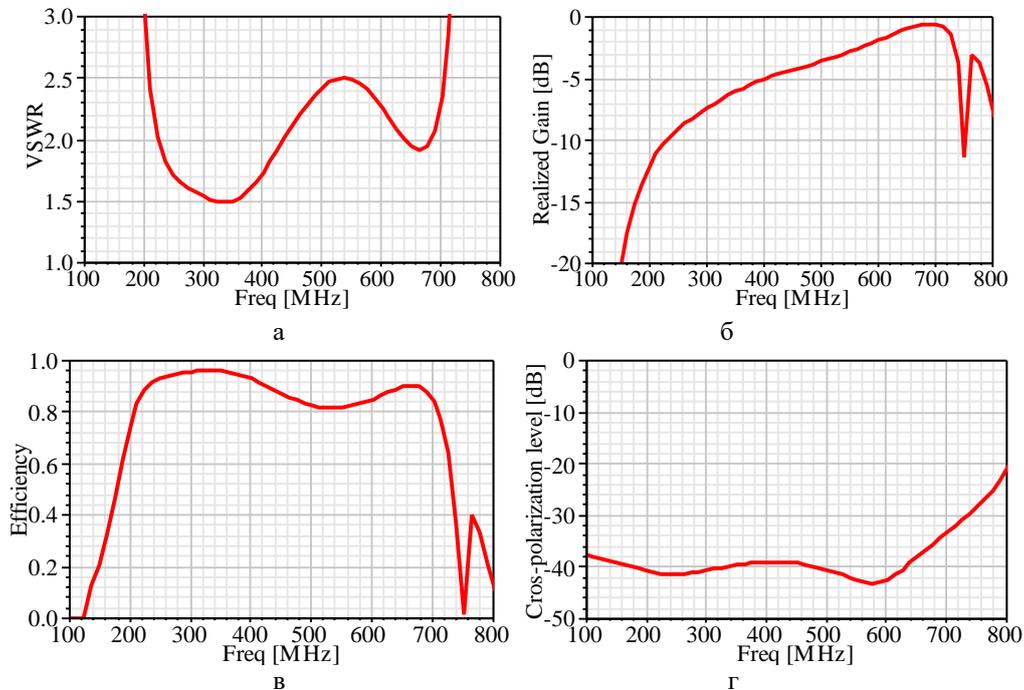


Рис. 2. Частотные характеристики КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) исходного излучателя

Из рис. 2,а видно, что рабочая полоса частот излучателя по уровню КСВН ≤ 3 находится в диапазоне от 201 до 715 МГц (КП = 3,557). При этом электрическая высота излучателя на верхней рабочей частоте равна $0,715 \lambda$, а на нижней – $0,201 \lambda$. Согласно рис. 2,б, в рабочей полосе частот излучателя значение реализованного коэффициента усиления находится в диапазоне от 11,88 до -0,57 дБ.

Из рис. 2,в видно, что в рабочей полосе частот излучателя значение КПД превышает 0,75, а из рис. 2,г видно, что в рабочей полосе частот значения уровня кроссовой поляризации в основном не превышают уровень 31 дБ. Следовательно, излучатель кардиоидной формы имеет линейную поляризацию с низким значением кроссовой поляризации.

Введение прямоугольных импедансных вставок по краям излучателя кардиоидной формы. Импедансные вставки расположены по краям верхней части излучателя (рис. 3). Отступ от края диэлектрической подложки до импедансных вставок составляет 1 мм.

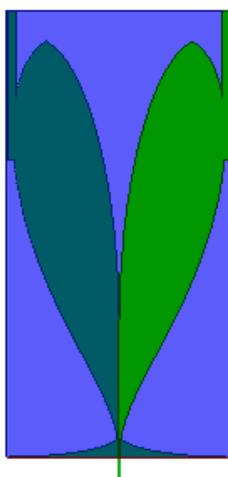


Рис. 3. Конструкция излучателя кардиоидной формы с импедансными вставками размером $5 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$

Исследование влияния ширины вставок W . Рассмотрим влияние импедансных вставок при изменении W в сторону раскрыва.

На рис. 4 приведены характеристики излучения КСВН, КУ, КПД и уровень кроссовой поляризации для излучателя из рис. 3 при следующих значениях их ширины: 5,0 мм (—), 10,0 мм (---), 15,0 мм (— —), 20,0 мм (.....) и 25,0 мм (— — —). В ходе дополнительного исследования выяснилось, что для достижения КП = 5 W необходимо увеличить до 25,5 мм (— — —). При этом высота вставок была принята равной 100 мм.

Согласно рис. 4,а, увеличение ширины вставок в сторону раскрыва приводит к небольшому расширению рабочей полосы частот и увеличению КП. Так, КП при ширине вставок 25,5 мм равен 5,091. Рабочая полоса частот при этом располагается в диапазоне 138,6–705,6 МГц. А вот КУ (рис. 4,б) практически не изменяется, так как излучатель является слабонаправленным и его КУ зависит в основном от размера апертуры.

Согласно рис. 4,в, в рабочей полосе частот излучателя значение КПД излучателя превышает 0,75 для ширины равной 25,5 мм. Значение частотной характеристики уровня кроссовой поляризации не превышает -26 дБ. По сравнению с излучателем из рис. 1 можно утверждать, что численные значения КПД и уровня кроссовой поляризации практически не изменились.

Дальнейшее увеличение размера вставок в сторону раскрыва приводит к уменьшению ширины щели и ухудшению характеристик излучения.

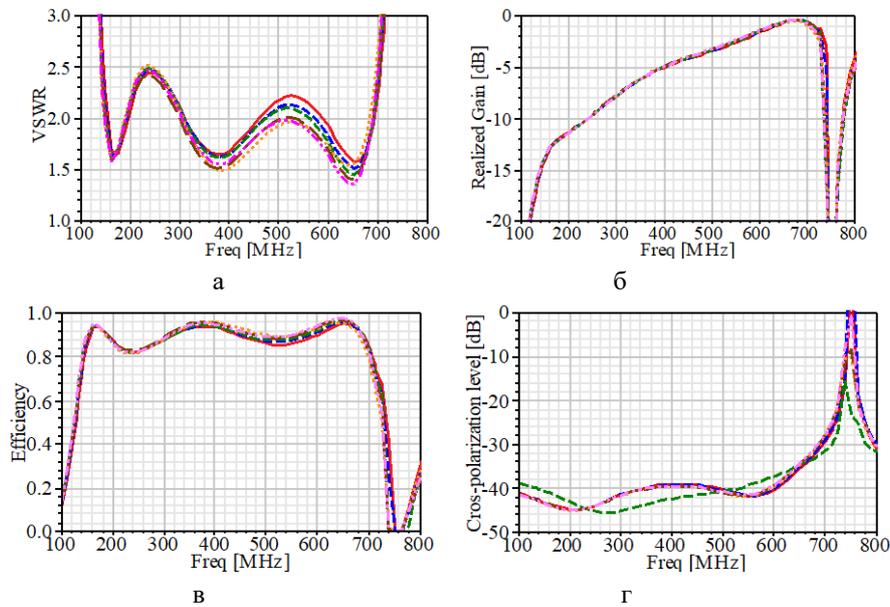


Рис. 4. Частотные характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы с увеличением ширины вставок в сторону раскрыва

Исследование влияния высоты вставок L при ширине 25,5 мм. Рассмотрим влияние изменения высоты (отсчитывается от верхней части излучателя) импедансных вставок L оптимальной ширины 25,5 мм на характеристики излучателя. Рассчитанные частотные характеристики КСВН, КУ, КПД и уровня кроссовой поляризации представлены на рис. 5. Они приведены для следующих значений L : 60 мм (—), 100 мм (---), 140 мм (—), 145 мм (---) и 160 мм (—).

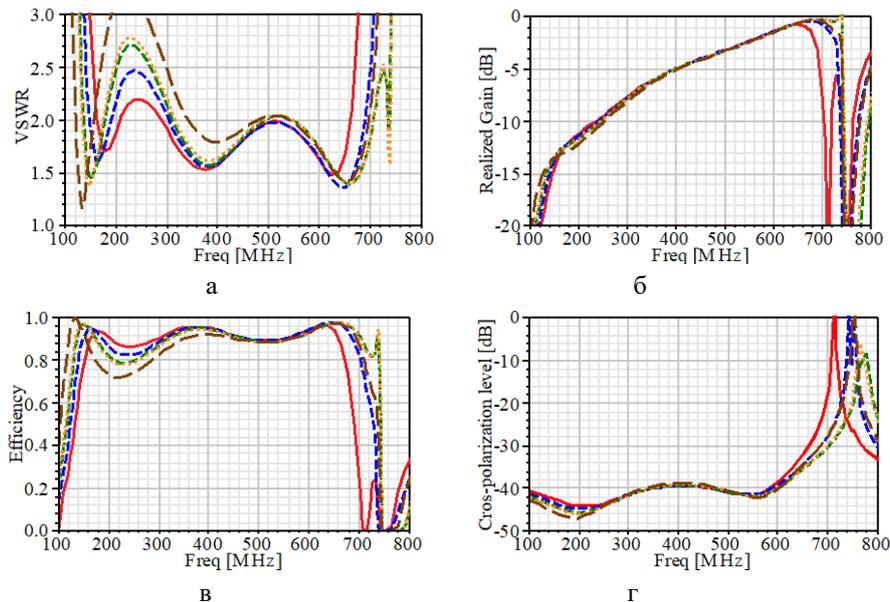


Рис. 5. Частотная характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы с увеличением высоты вставок при ширине 25,5 мм

Согласно рис. 5, с увеличением L ширина рабочей полосы частот увеличивается. При $L = 60$ мм рабочая полоса находится в диапазоне частот 149,8–673,8 МГц (КП равен 4,498), а при $L = 145$ мм – от 127,3 до 739,5 МГц (КП равен 5,809). Однако средний уровень КСВН в полосе частот 180–280 МГц плавно растет. КУ в рабочей полосе частот практически не изменяется. Увеличение высоты до 160 мм приводит к плавному уменьшению верхней рабочей частоты и уменьшению КП, а также превышению КСВН уровня КСВН = 3 в полосе 180–280 МГц, что также сужает рабочую полосу частот.

КПД, как и ранее, превышает 0,75. Высота вставок практически не влияет на значение уровня кроссовой поляризации за исключением частот более 650 МГц, где изменение высоты вставки влияет на верхнюю рабочую частоту. При этом при оптимальной высоте, равной 145 мм, уровень кроссовой поляризации не превышает -22 дБ, а на частотах менее 650 МГц – уровень -34 дБ.

Сравнение характеристик излучения исходного излучателя с излучателем с импедансными прямоугольными вставками оптимальных размеров. На рис. 6 представлена конструкция оптимального излучателя Вивальди кардиоидной формы с двумя прямоугольными импедансными вставками, расположенными в верхней части его лепестков. Размер вставок: $25,5 \times 145,0$ мм.

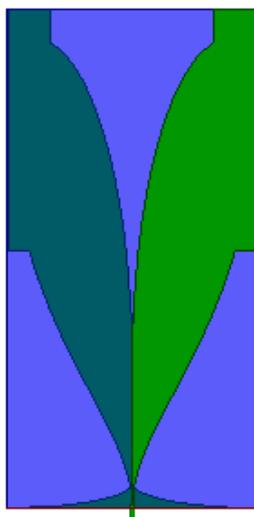


Рис. 6. Конструкция оптимального излучателя кардиоидной формы с импедансными вставками

На рис. 7 приведено сравнение частотных характеристик КСВН, КУ, КПД и уровня кроссовой поляризации для излучателя без импедансных вставок (—) и с ними (---).

Из рис. 7,а видно, что благодаря импедансным вставкам удалось уменьшить нижнюю рабочую частоту на 73,7 МГц (до 127,3 МГц) и увеличить верхнюю – на 24,5 МГц (до 739,5 МГц). Т. е. она расширилась почти на 100 МГц, а КП вырос с 3,557 до 5,809. Из рис. 7,б следует, что, благодаря улучшению КСВН, на частотах менее 200 МГц произошло увеличение КУ, что также отразилось и на изменении значений КПД (рис. 7,в). Наличие импедансных вставок, как это видно из рис. 7,г, существенно влияет на уровень кроссовой поляризации только в районе верхней рабочей частоты. Однако, как уже было отмечено ранее, на частотах менее 650 МГц, это влияние незначительно.

Также необходимо отметить, что разработанный излучатель с импедансными вставками является электрически компактным. Электрическая высота разработанного излучателя с импедансными вставками составляет $0,740 \lambda$ на верхней рабочей частоте 739,5 МГц и $0,127 \lambda$ на нижней рабочей частоте 127,3 МГц.

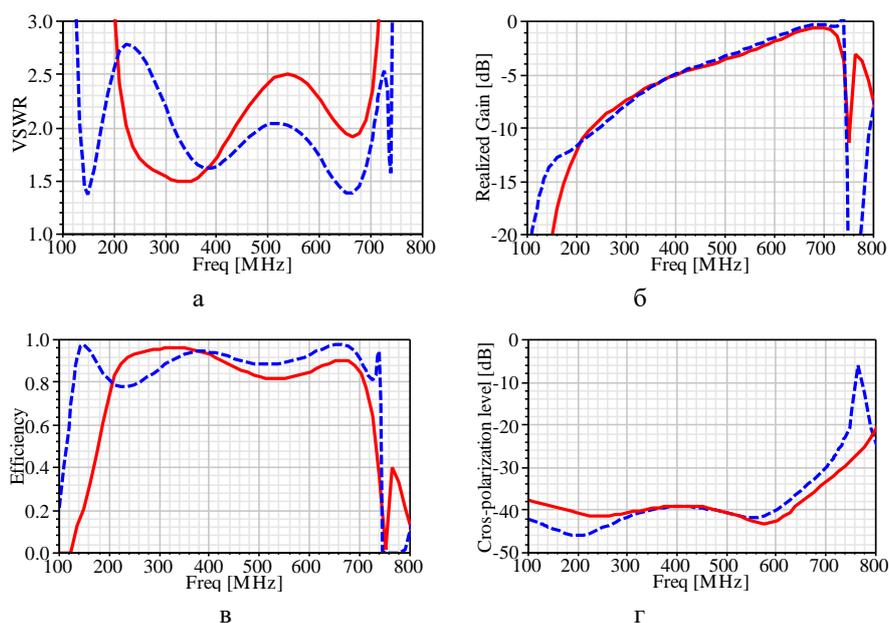


Рис. 7. Частотная характеристика КСВН (а), КУ (б), КПД (в) и уровня кроссовой поляризации (г) излучателя кардиоидной формы без импедансных вставок (—) и с импедансными вставками (---)

Выводы. Анализ результатов исследований показывает, что введение импедансных вставок прямоугольной формы позволяет существенно расширить рабочую полосу частот излучателя. Так, рабочая полоса частот излучателя без вставок располагалась в диапазоне от 201 до 715 МГц (КП = 3,557). Введение импедансных вставок шириной 25,5 мм и высотой 145 мм позволило уменьшить нижнюю рабочую частоту излучателя на 73,7 МГц (до 127,3 МГц) и увеличить верхнюю – на 24,5 МГц (до 739,5 МГц). Т.е. она расширяется почти на 100 МГц, а КП увеличивается с 3,557 до 5,809.

Таким образом, разработанный излучатель является сверхширокополосным с коэффициентом перекрытия 5,809:1 и электрически компактным с электрической высотой на верхней рабочей частоте равной $0,740 \lambda$, а на нижней – $0,127 \lambda$, а также обеспечивает работу ФАР в диапазоне 127,3–739,5 МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №РНФ/22-29-РТ (соглашение №22-19-00537, 12.05.2022, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>) в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, г. Таганрог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
2. Лазоренко О.Ф., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и физические процессы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – №2. – С. 166-194.
3. Чубинский Н.П., Кирьяшкин В.В., Хи Н.К. Об использовании сверхширокополосных сигналов для идентификации радиолокационных объектов // Журнал Радиоэлектроники. – 2010. – № 5. – С. 1-13.
4. Latha T., Ram G., Kumar G. A., Chakravarthy M. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 129742-129755.
5. Gibson P.J. The Vivaldi aerial // Proc. 9th European Microwave Conference. – 1979. – P. 101-105.
6. Dixit A.S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 45774-45796.

7. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The radiation characteristics of the Vivaldi antenna located on a cylindrical surface // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL). – 2017. – P. 1780-1784.
8. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The Radiation Characteristics of the Four-Element Vivaldi Antenna Arrays, Which Located on the Cylindrical Surface // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). – 2018. – P. 1617-1620.
9. *Kosak R.E., Gevorkyan A.V.* UWB Cardioid-Shaped Vivaldi Antenna // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2023. – P. 228-231.
10. *Kosak R.E., Gevorkyan A.V.* Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 211-214.
11. *Косак Р.Э., Геворкян А.В., Юханов Ю.В.* Излучатель фазированной антенной решетки узкоугольного сканирования // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2022). – 2022. – С. 258-263.
12. *Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.* Устройства СВЧ и антенны. – 2 изд. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
13. *Геворкян А. В.* Сверхширокополосная антенна Вивальди с малым коэффициентом стоячей волны // Актуальные проблемы радиофизики: Сб. трудов VII Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 34-37.
14. *Sahar Saleh, Mohd Haizal Jamaluddin, Farooq Razzaz, Saud M. Saeed, Nick Timmons, Jim Morrison* Compactness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – Vol. 74. – P. 195-229.
15. *Shi X., Cao Y., Hu Y., Luo X., Yang H. and Ye L.H.* A High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna With Director and Metamaterial at 1–28 GHz // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2021. – Vol. 20, No. 12. – P. 2432-2436.
16. *Zhu S., Liu H. and Wen P.* A New Method for Achieving Miniaturization and Gain Enhancement of Vivaldi Antenna Array Based on Anisotropic Metasurface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, No. 3. – P. 1952-1956.
17. *Zhou B. and Cui T.J.* Directivity Enhancement to Vivaldi Antennas Using Compactly Anisotropic Zero-Index Metamaterials // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 326-329.
18. *Хамед Е.А. Махьюб, Кисель Н.Н.* Оценка эффективности применения метаматериала в разработках микрополосковых антенн на основе LTCC-технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (17). – С. 179-190.
19. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS // Журнал Радиоэлектроники. – 2009. – № 5. – 736 с.
20. High Frequency Structural Simulator (HFSS) // ANSYS. – URL: www.ansys.com (дата обращения: 12.03.2024).

REFERENCES

1. *Khansen R.S.* Fazirovannye antennnye reshetki [Phased Array Antennas]. 2nd ed. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 560 p.
2. *Lazorenko O.F., Chernogor L.F.* Sverkhshirokopolosnye signaly i fizicheskie protsessy [Ultra-wideband signals and physical processes], *Radiofizika i radioastronomiya* [Radio physics and radio astronomy], 2008, No. 2, pp. 166-194.
3. *Chubinskiy N.P., Kir'yashkin V.V., Khi N.K.* Ob ispol'zovanii sverkhshirokopolosnykh signalov dlya identifikatsii radiolokatsionnykh ob"ektov [On the use of ultra-wideband signals to identify radar objects], *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2010, No. 5, pp. 1-13.
4. *Latha T., Ram G., Kumar G. A., Chakravarthy M.* Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 129742-129755.
5. *Gibson P.J.* The Vivaldi aerial, *Proc. 9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101-105.
6. *Dixit A.S., Kumar S.* A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 45774-45796.
7. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The radiation characteristics of the Vivaldi antenna located on a cylindrical surface, *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 2017, pp. 1780-1784.
8. *Gevorkyan A.V., Yukhanov Y.V., Privalova T.Y.* The Radiation Characteristics of the Four-Element Vivaldi Antenna Arrays, Which Located on the Cylindrical Surface, *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, 2018, pp. 1617-1620.

9. Kosak R.E., Gevorkyan A.V. UWB Cardioid-Shaped Vivaldi Antenna, *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2023, pp. 228-231.
10. Kosak R.E., Gevorkyan A.V. Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna, *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2021, pp. 211-214.
11. Kosak R.E., Gevorkyan A.V., Yukhanov Yu.V. Izluchatel' fazirovannoy antennoy reshetki uzkoougol'nogo skanirovaniya [Narrow-angle scanning phased array antenna radiator], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2022)* [Computer and information technologies in science, engineering and management (KomTech-2022)], 2022, pp. 258-263.
12. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. Ustroystva SVCh i anteny [Microwave devices and antennas]. 2nd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 376 p.
13. Gevorkyan A.V. Sverkhshirokopolosnaya antenna Vival'di s malym koeffitsientom stoyachey volny [Ultra-wideband Vivaldi antenna with low standing wave ratio], *Aktual'nye problemy radiofiziki: Sb. trudov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems of radiophysics: Collection of proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], 2017, pp. 34-37.
14. Sahar Saleh, Mohd Haizal Jamaluddin, Farooq Razzaz, Saud M. Saeed, Nick Timmons, Jim Morrison Compactness and performance enhancement techniques of ultra-wideband tapered slot antenna: A comprehensive review, *Alexandria Engineering Journal*, 2023, Vol. 74, pp. 195-229.
15. Shi X., Cao Y., Hu Y., Luo X., Yang H. and Ye L.H. A High-Gain Antipodal Vivaldi Antenna With Director and Metamaterial at 1–28 GHz, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, Vol. 20, No. 12, pp. 2432-2436.
16. Zhu S., Liu H. and Wen P. A New Method for Achieving Miniaturization and Gain Enhancement of Vivaldi Antenna Array Based on Anisotropic Metasurface, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Vol. 67, No. 3, pp. 1952-1956.
17. Zhou B. and Cui T.J. Directivity Enhancement to Vivaldi Antennas Using Compactly Anisotropic Zero-Index Metamaterials, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 326-329.
18. Khamed E.A. Makh'yub, Kisel' N.N. Otsenka effektivnosti primeneniya metamateriala v razrabotkakh mikropoloskovykh anten na osnove LTCC-tekhnologii [Evaluation of the metamaterial application efficiency in the development of microstrip antennas based on LTCC technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (17), pp. 179-190.
19. Bankov S.E., Kurushin A.A. Proektirovaniye SVCh ustroystv i anten s Ansoft HFSS [Designing microwave devices and antennas with Ansoft HFSS], *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2009, No. 5, 736 p.
20. High Frequency Structural Simulator (HFSS), ANSYS. Available at: URL: www.ansys.com (accessed 12 March 2024).

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

Косак Роман Эдуардович – Южный федеральный университет; e-mail: kosak@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371733; кафедра АиРПУ; аспирант; зав. лабораторией.

Геворкян Армен Валерьевич – e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; кафедра АиРПУ; к.т.н.; доцент.

Kosak Roman Eduardovich – Southern Federal University; e-mail: kosak@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371733; the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices; postgraduate student; head of the laboratory.

Gevorkyan Armen Valerievich – e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices; cand. of eng. sc.; associate professor.