

14. Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Bugakova A.V. Arsenid-gallievyy bufernyy usilitel', № RU 2784046 ot 2022 [Gallium arsenide buffer amplifier, No. RU 2784046 dated 2022].
15. Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Titov A.E. Neinvertiruyushchiy vykhodnoy kaskad arsenid-gallievogo operatsionnogo usilitelya, № RU 2784049 ot 2022 [Non-inverting output stage of a gallium arsenide operational amplifier, No. RU 2784049 of 2022].
16. Savchenko E.M., Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Pronin A.A. i dr. Arsenid-gallievyy bufernyy usilitel' na polevykh i bipolyarnykh p-n-p tranzistorakh, № RU 2788498 ot 2023 [Gallium arsenide buffer amplifier on field-effect and bipolar p-n-p transistors, No. RU 2788498 of 2023].
17. Prokopenko N.N. Nelineynaya aktivnaya korrektsiya v pretsizionnykh analogovykh mikroskhemakh: monografiya [Nonlinear active correction in precision analog microcircuits: monograph]. Rostov-on-Don, 2000, 223 p.
18. Prokopenko N.N., Nikulichev N.N. Nelineynaya korrektsiya na osnove upravlyaemykh kommutatorov toka i napryazheniya v analogovykh mikroskhemakh: monografiya [Nonlinear correction based on controlled current and voltage switches in analog microcircuits: monograph]. Shakhty, 2006, 115 p.
19. Prokopenko N.N., Zhuk A.A., Kunts A.V., Gavlitkiy A.I. Arsenid-gallievyy bufernyy usilitel' na osnove n-kanal'nykh polevykh i p-n-p bipolyarnykh tranzistorov, № RU 2784376 ot 2022 [Gallium arsenide buffer amplifier based on n-channel field-effect and p-n-p bipolar transistors, No. RU 2784376 of 2022].
20. Prokopenko N.N., Chumakov V.E., Kunts A.V., Zhuk A.A. Arsenid-gallievyy vykhodnoy kaskad bystrodeystvuyushchego operatsionnogo usilitelya, № RU 2773912 ot 2022 [Gallium arsenide output stage of a high-speed operational amplifier, No. RU 2773912 of 2022].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Жук Алексей Андреевич – Донской государственный технический университет; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79185880301; младший научный сотрудник отдела «Управление научных исследований»; ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника».

Zhuk Alexey Andreevich – Don State Technical University; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79185880301; junior research Fellow of the “Office of Scientific Research”; assistant of the Department of Information Systems and Radio Engineering.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-232-242

Р.Э. Косак

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА КОМПАКТНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВИВАЛЬДИ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ ВЫРЕЗАМИ НА КРОМКЕ

Исследовано влияние эллиптических вырезов на кромке компактного излучателя Вивальди, рассчитанного в составе бесконечной фазированной антенной решетки (ФАР) и конечной антенной решетки (АР), на его характеристики излучения. Оценены коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициент усиления (КУ) излучателя. Для излучателя в составе бесконечной ФАР характеристики излучения получены в секторе углов $\pm 60^\circ$ в плоскостях Е и Н. Определено, что введение вырезов эллиптической формы размером 3×2 мм на кромке излучателя Вивальди в составе бесконечной ФАР позволяет расширить рабочую полосу частот по уровню КСВН ≤ 3 в обеих плоскостях, а также улучшить средний уровень КСВН в Е-плоскости. В режиме сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ в Е-плоскости коэффициент перекрытия по уровню КСВН ≤ 3 увеличивается с 2,86 до 3,41, а в Н-плоскости в режиме сканирования в секторе углов $\pm 45^\circ$ коэффициент перекрытия по уровню КСВН ≤ 3 ($\leq 3,05$ при 45°) увеличивается с 2,74 до 3,15. Исследована 16-элементная АР компактных сверхширокополосных (СШП) излучателей Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке и без них. При добавлении эллиптических вырезов в конструкцию излучателей АР конечного размера коэффициент перекрытия увеличивается с 2,07 до 2,37. Определено, что АР, также как и излучатель в составе бесконечной ФАР, является СШП и может работать в диапазоне от 283,8 до 671,3 МГц по уровню КСВН ≤ 3 , чему соответствует коэффициент перекрытия $\sim 2,37$. Средний уровень КСВН при включении всех излучателей располагается по уровню КСВН = 4, а при подключении одного ряда излучателей на согласованные на-

грузки – по уровню КСВН = 1,6. В основном практически во всей рабочей полосе частот в этом случае значение КСВН ниже уровня КСВН = 2,3. КУ в рабочей полосе частот располагается в пределах от 3,82 до 9,50 дБ.

Антенная решетка; вырезы эллиптической формы на кромке; компактный излучатель Вивальди; КСВН; коэффициент усиления; режим широкоугольного сканирования; сверхширокая полоса частот.

R.E. Kosak

ANTENNA ARRAY OF COMPACT VIVALDI RADIATORS WITH ELLIPTICAL SHAPE CUTOUTS ON THEIR OUTER EDGE

The influence of elliptical cutouts on the outer edge of a compact Vivaldi radiator, designed as part of an infinite phased array (PA) and a finite antenna array (AA), on its radiation characteristics is investigated. The voltage standing wave ratio (VSWR) and realized gain (RG) of the radiator are estimated. For the radiator as part of the infinite PA, the radiation characteristics were obtained in the sector of angles $\pm 60^\circ$ in the E- and H-planes. The research determined that the introduction of elliptical cutouts measuring 3×2 mm on the outer edges of the Vivaldi radiator as part of the PA makes it possible to expand the operating frequency band in terms of $VSWR \leq 3$ in both planes, and improve the average level of matching in wide-angle scanning mode in the E-plane. In the E-plane in scanning mode in the sector of angles $\pm 60^\circ$, the overlap ratio at the level of $VSWR \leq 3$ increases from 2.86 to 3.41, and in the H-plane in scanning mode in the sector of angles $\pm 45^\circ$, the overlap ratio at the level of $VSWR \leq 3$ ($\leq 3,05$ at 45°) increases from 2.74 up to 3.15. A 16-element array from the compact ultra-wideband (UWB) Vivaldi radiators with and without elliptical cutouts is researched. When using elliptical cutouts in the design of finite-size antenna array radiators, the overlap ratio increases from 2.07 to 2.37. It has been determined that the AA, as well as the radiator in the PA, is UWB and can operate in the range from 283.8 to 671.3 MHz at the $VSWR$ level ≤ 3 , which corresponds to overlap ratio ~ 2.37 . The average $VSWR$ level when all radiators are turned on is located at the $VSWR$ level = 4, and when connecting one row of radiators to matched loads – at the $VSWR$ level = 1.6. Basically, over almost the entire operating frequency band in this case, the $VSWR$ value is below the $VSWR$ level = 2.3. The realized gain in the operating frequency band is in the range from 3.82 to 9.50 dB.

Antenna array; elliptical cutouts on the outer edge; compact Vivaldi radiator; VSWR; realized gain; wide-angle scanning mode; ultra-wide frequency band.

Введение. В радиолокационных и радионавигационных системах обеспечения аэропортов, системах спутникового вещания и связи с подвижными объектами, системах обеспечения безопасности движения автомобиля, а также радиоастрономических системах широкое применение находят АР и ФАР [1, 2]. Известно применение ФАР в медицине [3, 4], системах цифрового телевидения [5] и спутниковых мобильных телекоммуникационных системах [6].

АР и ФАР, содержащие большое количество излучающих печатных элементов, поддаются анализу на основе теоремы Флоке для периодических ячеек [7]. В качестве излучателей АР и ФАР используют вибраторы, открытые концы волноводов, диэлектрические стержни, спирали и так далее [8]. В последнее время все большее внимание уделяется печатным излучателям, разработанным на основе антенн Вивальди [9–11]. Важную роль играет форма излучателя Вивальди – именно она во многом определяет его характеристики излучения.

Использование вырезов на кромке позволяет расширить рабочую полосу частот, улучшить согласование и КУ [11–19]. Согласно [11], прямоугольная форма вырезов на кромке излучателя Вивальди позволяет уменьшить его электрический размер, что делает его более компактным. Использование прямоугольных вырезов на кромке излучателя также позволяет улучшить КУ и увеличить согласование излучателя, улучшить направленность [12] и уменьшить уровень боковых лепестков [13]. Синусоидальная форма вырезов также позволяет увеличить КУ и уменьшить коэффициент отражения [14]. Более того, по сравнению с прямоугольной формой вырезов, синусоидальная форма может улучшить КУ в рабочей полосе частот в среднем на 3 дБ и коэффициент полезного действия до 0,9 [18].

Влияние размеров прямоугольной формы гофр на коэффициент отражения и КУ оценено в [19]. Показано, что прямоугольная форма гофр с одинаковым размером, а также с уменьшающимся размером в сторону раскрыва антенны Вивальди в рабочей полосе частот приводит к увеличению КУ и снижению коэффициента отражения, а прямоугольной формы гофр с увеличивающимся размером в сторону раскрыва антенны – наоборот.

Таким образом, из представленных работ видно, что изменение кромки лепестков излучателя Вивальди является довольно распространенным способом улучшения характеристик излучения. При этом, прямоугольная форма гофр является наиболее распространенной, а работ с эллиптическими формами гофр или схожими с ними меньше.

Цель работы состоит в улучшении согласования и расширении рабочей полосы частот компактного СШП излучателя Вивальди путем введения эллиптических вырезов на его кромке.

Излучатель Вивальди без эллиптических вырезов на кромке. В работе за основу взят излучатель Вивальди, представленный на рис. 1 [15]. Подложка выполнена из материала RT/duroid 5880, а питание производится с помощью коаксиального кабеля сопротивлением 50 Ом. Размер ячейки в составе ФАР $100 \times 120 \times 185$ мм. Расчет в составе бесконечной АР с использованием периодических граничных условий на боковых поверхностях ячейки позволяет существенно сократить объем вычислений [20].

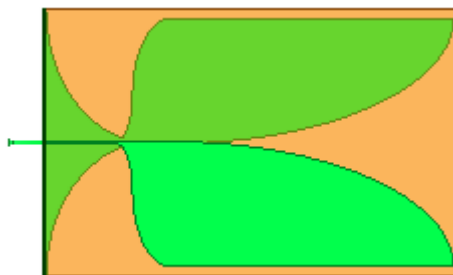


Рис. 1. Излучатель Вивальди без вырезов на кромке

Из [15] следует, что описанная конструкция излучателя Вивальди позволяет добиться сверхширокой рабочей полосы частот в широком секторе углов сканирования в диапазоне $\pm 60^\circ$. Также этот излучатель является электрически компактным: его высота на верхней рабочей частоте составляет $\sim 0,5 \lambda$.

Рассмотрены КСВН и КУ излучателя в составе бесконечной ФАР в диапазоне от 200 до 1000 МГц в режиме сканирования в плоскостях Е и Н. На рис. 2, 3 каждой кривой соответствует определенное значение угла сканирования: 0° (—), 15° (---), 30° (—), 45° (.....) и 60° (—).

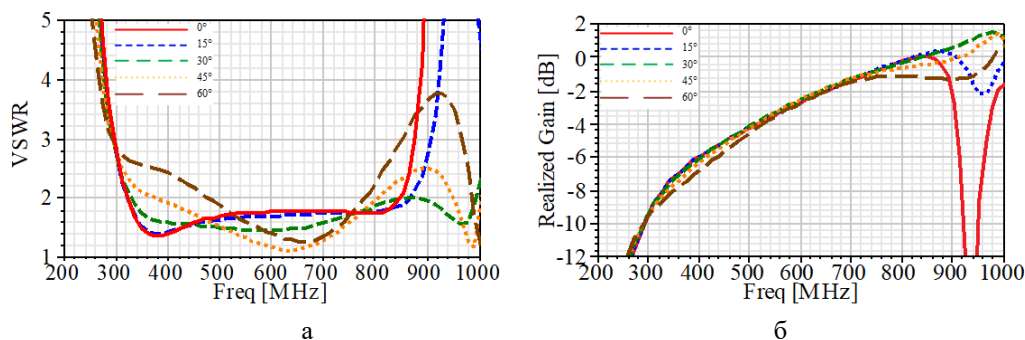


Рис. 2. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди без эллиптических вырезов на кромке в режиме сканирования в Е-плоскости

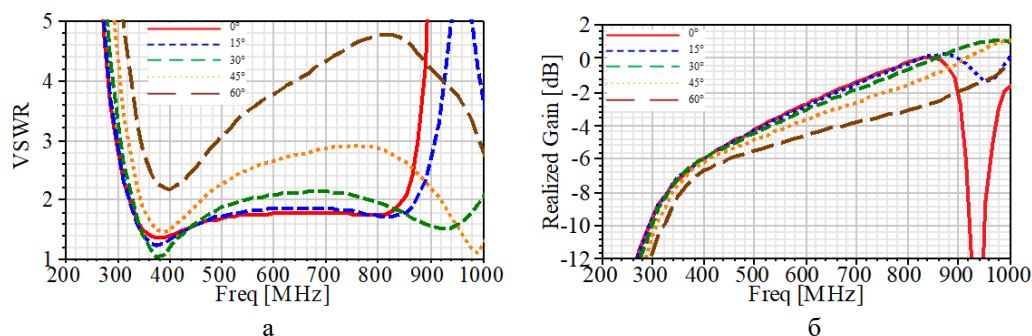


Рис. 3. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди без эллиптических вырезов на кромке в режиме сканирования в H -плоскости

Согласно рис. 2,а, рабочая полоса частот излучателя Вивальди (рис. 1) в E -плоскости находится в пределах от 297 до 848 МГц по уровню КСВН ≤ 3 в режиме сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$. Коэффициент перекрытия, определяемый как отношение верхней граничной частоты к нижней, равен 2,86. Как видно из рис. 2,б, КУ в указанной полосе частот находится в пределах от минус 9,71 до 0,28 дБ.

Согласно рис. 3,а, рабочая полоса частот исследуемого излучателя Вивальди в H -плоскости находится в пределах от 319 до 874 МГц по уровню КСВН ≤ 3 (коэффициент перекрытия $\sim 2,74$) в режиме сканирования в секторе углов $\pm 45^\circ$. КУ в указанной полосе частот, согласно рис. 3,б находится в пределах от минус 9,10 до 0,34 дБ.

Исследование влияния эллиптических вырезов на кромке излучателя. Для оценки влияния эллиптических вырезов на кромке излучателя Вивальди (рис. 4) на характеристики излучения рассмотрены вырезы высотой от 1 до 4 мм с шагом 1 мм и шириной от 1 до 4 мм с шагом 1 мм. Определено, что введение эллиптических вырезов на кромке шириной 1, 2 и 4 мм, а также высотой 1, 3 и 4 мм не приводит к значительному расширению рабочей полосы частот, однако снижает средний уровень КСВН. В итоге выбраны вырезы размером 3×2 мм, причем в нижней части излучателя ширина плавно возрастает до 10 мм, а их общее количество равно 35 с каждой стороны. Эллиптические вырезы на кромке расположены с периодом 4 мм.

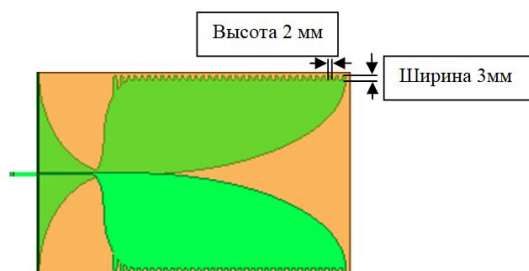


Рис. 4. Излучатель Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке

На рис. 5, 6 приведены характеристики излучателя Вивальди при размере эллиптических вырезов 3×2 мм (рис. 4), причем каждой кривой соответствует определенное значение угла сканирования: 0° (—), 15° (---), 30° (— · —), 45° (····) и 60° (— — —).

Из рис. 5,а можно определить, что рабочая полоса частот излучателя Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке в режиме сканирования в E -плоскости в секторе углов $\pm 60^\circ$ находится в пределах от 251 до 857 МГц по уровню КСВН ≤ 3 (коэффициент перекрытия $\sim 3,41$). КУ в указанной полосе частот находится в пределах от минус 10,86 до 0,89 дБ, как видно из рис. 5,б.

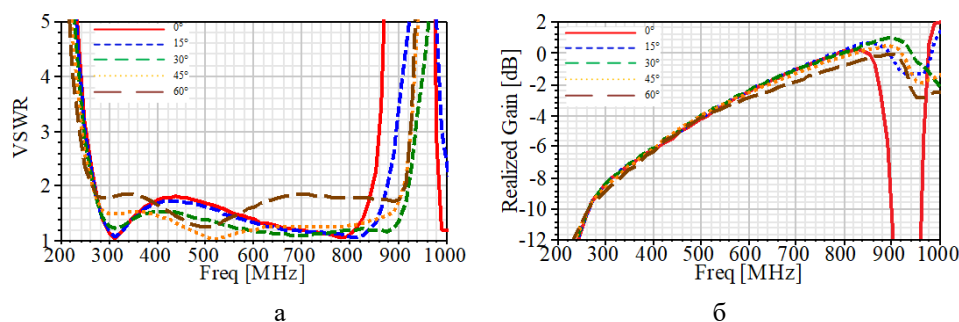


Рис. 5. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке в режиме сканирования в Е-плоскости

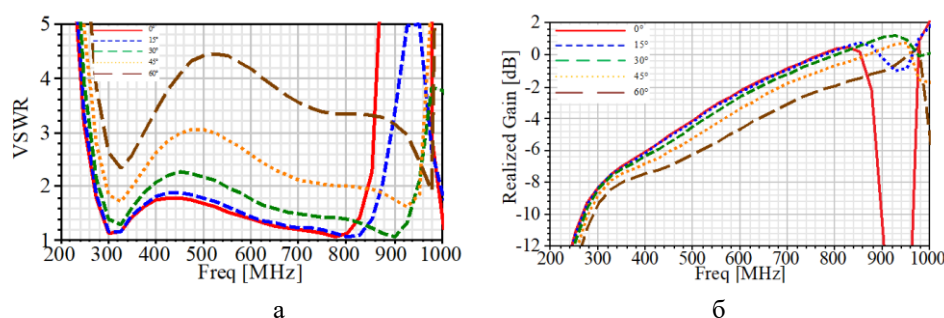


Рис. 6. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке в режиме сканирования в Н-плоскости

Согласно рис. 6,а, рабочая полоса частот излучателя Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке в Н-плоскости находится в пределах от 271 до 854 МГц по уровню КСВН ≤ 3 ($\leq 3,05$ при 45°) в режиме сканирования в секторе углов $\pm 45^\circ$. Коэффициент перекрытия $\sim 3,15$, а КУ в указанной полосе частот, как видно из рис. 6,б, находится в пределах от минус 11,27 до 0,59 дБ. При этом, уровень КСВН при сканировании на 45° на частотах 470–500 МГц располагается немного выше уровня КСВН = 3. Однако, если рассмотреть средний уровень КСВН в Е-плоскости – для излучателя с эллиптическими вырезами на кромке он окажется ниже на 0,8 по сравнению с излучателем без вырезов (рис. 2,а и 5,а).

Для наглядности влияния эллиптических вырезов на кромке излучателя на характеристики излучения при сканировании на 60° на рис. 7, 8 приведены КСВН и КУ для излучателя без вырезов (—) (рис. 1) и излучателя с эллиптическими вырезами на кромке (---) (рис. 4) в Е- и Н-плоскостях, соответственно.

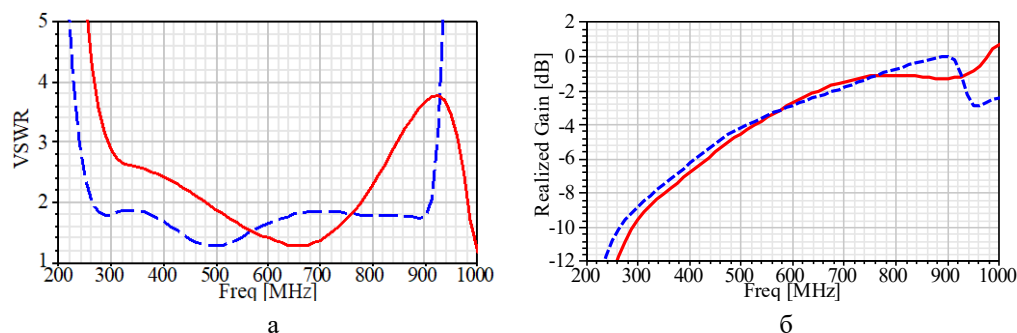


Рис. 7. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди без вырезов (—) и излучателя с эллиптическими вырезами на кромке (---) на 60° в Е-плоскости

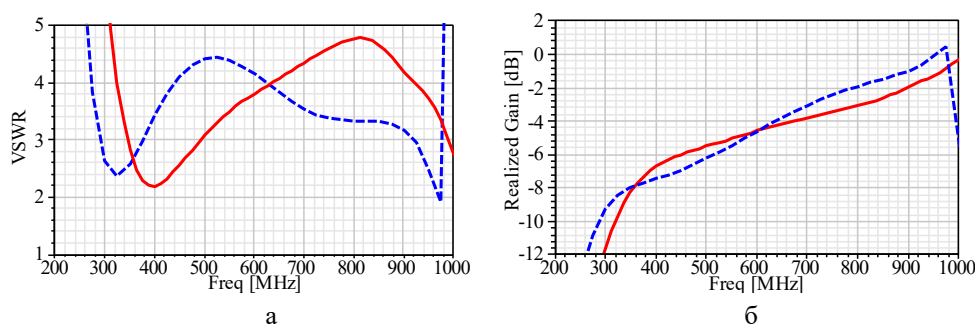


Рис. 8. КСВН (а) и КУ (б) излучателя Вивальди без вырезов (—) и излучателя с эллиптическими вырезами на кромке (---) на 60° в Н-плоскости

Из рис. 7,а можно определить, что рабочая полоса частот излучателя без вырезов на 60° в Е-плоскости по уровню КСВН ≤ 2 находится в пределах от 480 до 776 МГц, а излучателя с эллиптическими вырезами на кромке по тому же уровню находится в пределах от 264 до 910 МГц. Рабочая полоса частот на 60° в Е-плоскости при введении эллиптических вырезов на кромке излучателя расширяется на 350 МГц (с 296 МГц до 646 МГц). Увеличение КУ более чем на 1 дБ заметно в диапазоне от 850 до 920 МГц, согласно рис. 7,б.

Из рис. 8,а можно определить, что КСВН излучателя без вырезов и излучателя с эллиптическими вырезами на кромке на 60° в Н-плоскости отличается по форме, однако его средний уровень не изменяется. КУ в диапазоне от 264 до 355 МГц и от 600 до 975 МГц увеличивается не более чем на 3,0 дБ, а в диапазоне от 355 до 600 МГц наоборот – уменьшается не более, чем на 1,2 дБ, согласно рис. 8,б.

Анализ проведенных исследований показывает, что рабочая полоса частот излучателя с эллиптическими вырезами на кромке по уровню КСВН ≤ 2 в Е-плоскости оказывается шире и при сканировании до $\pm 60^\circ$ располагается от 270 до 842 МГц (коэффициент перекрытия $\sim 3,12$). В Н-плоскости эллиптические вырезы на кромке позволяют расширить рабочую полосу частот на 28 МГц при сканировании в секторе углов $\pm 45^\circ$.

Проведено сравнение разработанных излучателей без вырезов, с эллиптическими и прямоугольными вырезами на кромке [15]. Излучатель Вивальди с эллиптическими вырезами на кромке так же, как и излучатель без вырезов или излучатель с прямоугольной формой вырезов будет сверхширокополосным, однако средний уровень его КСВН лучше. Так, КСВН излучателя без вырезов в Е-плоскости в основном располагается ниже уровня КСВН = 2,7 излучателя с прямоугольной формой вырезов – ниже уровня КСВН = 2,3, а излучателя с эллиптической формой вырезов – ниже уровня КСВН = 1,9. Более того, излучатель с эллиптическими вырезами на кромке будет являться СШП даже в режиме сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ по уровню КСВН ≤ 2 . КУ излучателей в рабочей полосе частот при введении вырезов разной формы изменяется слабо, так как размер ячейки бесконечной ФАР при использовании эллиптических вырезов на кромке не меняется.

Необходимо отметить, что электрические размеры разработанного СШП излучателя с эллиптическими вырезами на кромке в режиме сканирования в Е-плоскости в секторе углов $\pm 60^\circ$ на верхней рабочей частоте 857 МГц составляют: $0,286 \lambda \times 0,343 \lambda \times 0,528 \lambda$, а на нижней – 251 МГц: $0,084 \lambda \times 0,100 \lambda \times 0,155 \lambda$.

16-элементная антенная решетка. Характеристики излучения, которые представлены на рис. 2, 3, 5 и 6, рассчитаны для излучателей в составе бесконечной ФАР. Для проверки работы излучателя без эллиптических вырезов и излучателя с эллиптическими вырезами в составе конечных решеток необходимо разработать электродинамическую модель АР конечного размера. Чем большее количество излучателей содержит АР, тем ближе будут характеристики излучения ее элементов к тем, которые представлены для излучателей в составе бесконечной ФАР. При этом, необходимо отметить, что большее количество излучателей АР конечного размера требует больших вычислительных затрат ЭВМ, вследствие чего были разработаны и рассчитаны электродинамические модели малоэлементных АР из 16 излучателей.

Исследованы АР с размером каждой ячейки 120×120 мм. Модель 16-элементной АР из излучателей без вырезов эллиптической формы на кромке из рис. 1, представлена на рис. 9. АР из излучателей с эллиптическими вырезами на кромке будет иметь такой же размер.

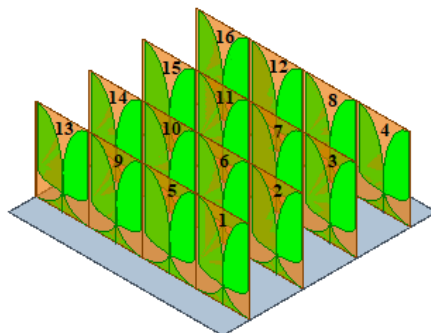


Рис. 9. 16-элементная АР излучателей Вивальди без вырезов на кромке

Характеристики излучения АР (см. рис. 9) при включении всех излучателей без вырезов представлены на рис. 10, а при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом представлены на рис. 11. В табл. 1 представлено соответствие между номером излучателя, а также цветом и формой кривой на графиках КСВН 16-элементной решетки. Данные таблицы справедливы как для АР излучателей без эллиптических вырезов, так и для АР с вырезами эллиптической формы на кромке.

Таблица 1

Соответствие номера излучателя АР цвету и форме кривой

Номер излучателя	Цвет и форма кривой	Номер излучателя	Цвет и форма кривой	Номер излучателя	Цвет и форма кривой	Номер излучателя	Цвет и форма кривой
1	— (green solid)	5	— (yellow dashed)	9	— (orange dotted)	13	— (red dash-dot)
2	— (teal solid)	6	— (purple dashed)	10	— (yellow dotted)	14	— (green dash-dot)
3	— (magenta solid)	7	— (cyan dashed)	11	— (blue dotted)	15	— (blue dash-dot)
4	— (black solid)	8	— (yellow dashed)	12	— (grey dotted)	16	— (pink dash-dot)

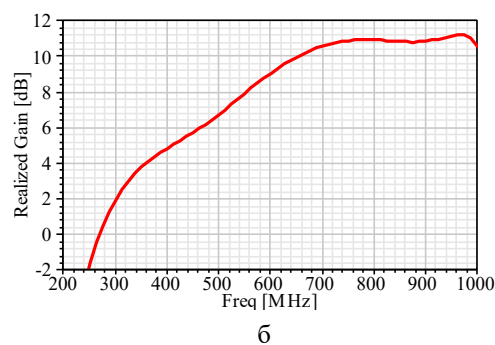
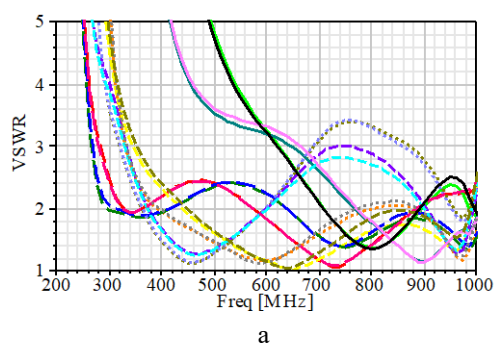


Рис. 10. КСВН (а) и КУ (б) 16-элементной решетки при включении всех излучателей без вырезов эллиптической формы на кромке

При включении всех излучателей, представленных на рис. 9, ухудшается средний уровень КСВН всей решетки. Рабочая полоса частот по уровню КСВН ≤ 3 располагается от 872 до 1000 МГц, а коэффициент перекрытия $\sim 1,15$, как видно из рис. 10,а. Согласно рис. 10,б, КУ в указанной рабочей полосе частот находится в диапазоне от 10,76 до 11,19 дБ.

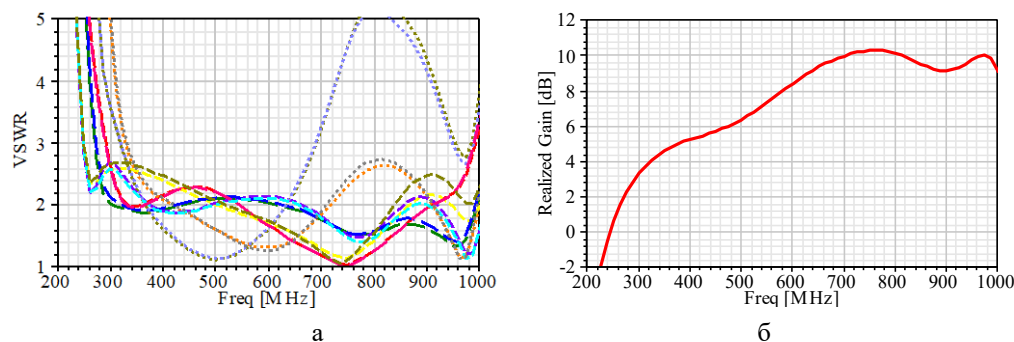


Рис. 11. КСВН (а) и КУ (б) 16-элементной решетки при подключении излучателей без вырезов 1–4 на согласованные нагрузки

При этом, в случае подключения излучателей 1–4 (рис. 7) на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом, средний уровень КСВН АР улучшается. Так, согласно рис. 11,а, рабочая полоса частот по уровню КСВН ≤ 3 располагается в диапазоне 332,6–688,2 МГц, чему соответствует коэффициент перекрытия $\sim 2,07$. КУ в рабочей полосе частот располагается в пределах от 4,28 до 9,83 дБ, что следует из рис. 11,б.

Характеристики излучения АР из излучателей с вырезами эллиптической формы на кромке (см. рис. 4) при включении всех излучателей представлены на рис. 12, а при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом представлены на рис. 13.

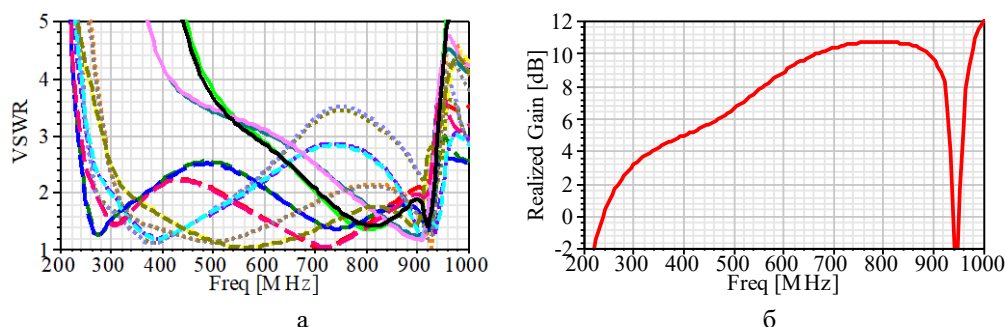


Рис. 12. КСВН (а) и КУ (б) 16-элементной решетки при включении всех излучателей с вырезами эллиптической формы на кромке

При включении всех излучателей с эллиптическими вырезами ухудшается средний уровень КСВН всей решетки. Рабочая полоса частот по уровню КСВН ≤ 3 располагается от 485,8 до 943,6 МГц, а коэффициент перекрытия $\sim 1,942$, как видно из рис. 12,а. Согласно рис. 12,б, КУ в указанной рабочей полосе частот находится в диапазоне от минус 1,52 до 10,75 дБ.

В случае подключения излучателей с вырезами эллиптической формы на кромке 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом, средний уровень КСВН АР улучшается. Так, согласно рис. 13,а, рабочая полоса частот по уровню КСВН ≤ 3 в этом случае располагается в диапазоне 283,8–671,3 МГц, чему соответствует коэффициент перекрытия $\sim 2,37$. КУ в рабочей полосе частот располагается в пределах от 3,82 до 9,50 дБ, что следует из рис. 13,б.

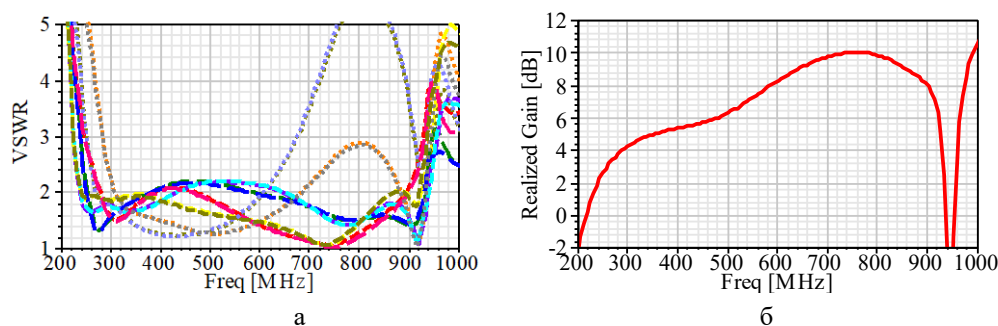


Рис. 13. КСВН (а) и КУ (б) 16-элементной решетки при подключении излучателей с вырезами 1–4 на согласованные нагрузки

Из рис. 11,б и 13,б видно, что при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом средний уровень КУ уменьшается. Это связано с уменьшением количества активных элементов АР. Таким образом, улучшение среднего уровня согласования АР связано с ухудшением среднего уровня КУ.

Таким образом, использование эллиптических вырезов на кромке излучателя Вивальди в составе 16-элементной АР позволяет расширить ее рабочую полосу частот на 330 МГц при включении всех излучателей и на 52 МГц при подключении излучателей 1–4 (см. рис. 9) на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом. При этом, коэффициент перекрытия увеличивается с 2,07 до 2,37. Обе АР при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом будут СШП, однако коэффициент перекрытия АР излучателей с эллиптическими вырезами на кромке будет больше. КУ в случае подключения излучателей 1–4 АР на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом практически не изменяется.

Как видно из представленных результатов, улучшение КСВН крайних элементов малоэлементных решеток является актуальной задачей и требует поиска новых путей решений этой проблемы. Одним из решений может являться подключение крайнего ряда излучателей на согласованные нагрузки, однако в этом случае наблюдается ухудшение КУ АР.

Выводы. Использование эллиптических вырезов на кромке размером 3×2 мм позволяет расширить рабочую полосу частот излучателя Вивальди в составе бесконечной ФАР в режиме сканирования в обеих плоскостях, а также улучшить согласование при работе в Е-плоскости. Так, в Е-плоскости в режиме сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ коэффициент перекрытия по уровню КСВН ≤ 3 возрастает с 2,86 до 3,41, а в Н-плоскости в режиме сканирования в секторе углов $\pm 45^\circ$ коэффициент перекрытия по уровню КСВН $\leq 3,05$ возрастает с 2,74 до 3,15. При этом, при работе в Е-плоскости в режиме сканирования в секторе углов $\pm 60^\circ$ излучатель является СШП как по уровню КСВН ≤ 3 , так и по уровню КСВН ≤ 2 , следовательно среднее значение согласования у излучателя с эллиптическими вырезами на кромке лучше.

Исследованы характеристики излучателя без эллиптических вырезов и с ними в составе разработанных 16-элементных АР. При добавлении эллиптических вырезов в конструкцию излучателей АР конечного размера коэффициент перекрытия увеличивается с 2,07 до 2,37. Обе АР при подключении излучателей 1–4 на согласованные нагрузки сопротивлением 50 Ом будут сверхширокополосными, однако коэффициент перекрытия АР излучателей с эллиптическими вырезами на кромке будет больше. Рабочий диапазон АР из излучателей с эллиптическими вырезами располагается в полосе частот 283,8–671,3 МГц, однако КСВН крайнего ряда излучателей 1–4 довольно велик. Необходимо искать новые пути решения этой проблемы, вследствие чего улучшение КСВН крайних элементов малоэлементных АР является актуальной задачей. Одним из решений может являться подключение крайнего ряда излучателей на согласованные нагрузки, однако в этом случае наблюдается ухудшение КУ АР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Проект No22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/>) в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета, г. Таганрог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию): учеб. пособие для вузов. – М.: Сайнс-пресс, 2002. – 231 с.
2. Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А. [и др.]. Антенны: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2022. – 412 с.
3. Гаврилов Л.Р. Двумерные фазированные решетки для применения в хирургии: многофокусная генерация и сканирование // Акустический журнал. – 2003. – Т. 49, № 5. – С. 604-612.
4. Гольдина И.М., Трофимова Е.Ю., Коков Л.С. [и др.]. Возможности внутрисосудистого ультразвукового исследования с использованием катетерного датчика с фазированной решеткой в диагностике и лечении расслоения аорты // Ультразвуковая и функциональная диагностика. – 2016. – № 1. – С. 78-89.
5. Калашиников С.Н., Белоусов О.А. Фазированная антенная решетка для систем цифрового телевидения // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 3 (53). – С. 62-67.
6. Овчинникова Е.В., Гаджиев Э.В., Кондратьева С.Г. [и др.]. Антенные решетки спутниковых мобильных телекоммуникационных систем // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 182, № 3. – С. 39-54.
7. Хансен Р.С. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т. 1: пер. с англ. / под ред. Маркова Г.Т. и Чаплина А.Ф. – М.: Изд-во Советское радио, 1966. – 538 с.
8. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М. [и др.]. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2003. – 631 с.
9. Gibson P.J. The Vivaldi aerial // Proc. 9th European Microwave Conference. – 1979. – P. 101-105.
10. Latha T., Ram G., Kumar G.A., Chakravarthy M. Review on Ultra-Wideband Phased Array Antennas // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 129742-129755.
11. 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.
12. Eichenberger J., Yetisir E., Ghalichechian N. High-gain antipodal Vivaldi antenna with pseudoelement and notched tapered slot operating at (2.5 to 57) GHz // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2019. – Vol. 67, No. 7. – P. 4357-4366.
13. Dixit A.S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 45774-45796.
14. Loo X.S., Win M.Z., Yeo K.S. A high gain 60 GHz antipodal Fermi-tapered slot antenna based on robust synthesized dielectric // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2018. – Vol. 61, No. 3. – P. 761-765.
15. 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.
16. 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.
17. Косак Р.Э., Геворкян А.В. Компактный сверхширокополосный излучатель Вивальди кардиоидной формы с прямоугольными импедансными вставками // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 276-284. – DOI: 10.18522/2311-3103-2024-3-276-284.
18. Briqech Z., Sebak A., Denidni T. A. High gain 60 GHz antipodal Fermi tapered slot antenna with sine corrugation // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2014. – Vol. 57, No. 1. – P. 6-9.
19. Phalak K.D., Briqech Z., and Sebak A. Ka-band antipodal Fermilinear tapered slot antenna with a knife edge corrugation // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2014. – Vol. 57, No. 2. – P. 485-489.
20. Инденбом М.В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции: монография. – М.: Радиотехника, 2015. – 416 с.

REFERENCES

1. Vendik O.G., Parnes M.D. Antennы s elektricheskim skanirovaniem (vvedenie v teoriyu): ucheb. posobie dlya vuzov [Electrically scanned antennas (introduction to theory): a textbook for universities]. Moscow: Sayns-press, 2002, 231 p.

2. Zyryanov Yu.T., Fedyunin P.A., Belousov O.A. [i dr.]. Antennы: ucheb. posobie dlya vuzov [Antennas: a textbook for universities]. 5th ed. St. Petersburg: Lan', 2022, 412 p.
3. Gavrilov L.R. Dvumernye fazirovannye reshetki dlya primeneniya v khirurgii: mnogofokusnaya generatsiya i skanirovaniye [2D phased arrays for surgical applications: multifocal generation and scanning], *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustic magazine], 2003, Vol. 49, No. 5, pp. 604-612.
4. Gol'dina I.M., Trofimova E.Yu., Kokov L.S. [i dr.]. Vozmozhnosti vnutrisudistogo ul'tra-zvukovogo issledovaniya s ispol'zovaniem kateternogo datchika s fazirovannoy reshetkoy v diagnostike i lechenii rassloeniya aorty [The potential of intravascular ultrasound using a phased array catheter probe in the diagnosis and treatment of aortic dissection], *Ul'trazvukovaya i funktsional'naya diagnostika* [Ultrasound and functional diagnostics], 2016, No. 1, pp. 78-89.
5. Kalashnikov S.N., Belousov O.A. Fazirovannaya antennaya reshetka dlya sistem tsifrovogo televideniya [Phased array digital TV systems], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of modern science and practice. University named after V.I. Vernadsky], 2014, No. 3 (53), pp. 62-67.
6. Ovchinnikova E.V., Gadzhiev E.V., Kondrat'eva S.G. [i dr.]. Antennnye reshetki sputnikovyykh mobil'nykh telekommunikatsionnykh sistem [Antenna arrays for satellite mobile telecommunication systems], *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM* [Questions of electromechanics. Proceedings of VNIEM], 2021, Vol. 182, No. 3, pp. 39-54.
7. Khansen R.S. Skaniruyushchie antennnye sistemy SVCh [Microwave scanning antennas]. Vol. 1: transl. from engl., ed. by Markov G.T. and Chaplin A.F. Moscow: Izd-vo Sovetskoe radio, 1966, 538 p.
8. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M. [i dr.]. Ustroystva SVCh i antenny. Proektirovaniye fazirovannykh antennnykh reshetok: ucheb. posobie dlya vuzov [Microwave devices and antennas. Design of phased array antennas: A textbook for universities]. 3rd ed. Moscow: Radiotekhnika, 2003, 631 p.
9. Gibson P.J. The Vivaldi aerial, *Proc. 9th European Microwave Conference*, 1979, pp. 101-105.
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.
11. 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.
12. Eichenberger J., Yetisir E., Ghalichechian N. High-gain antipodal Vivaldi antenna with pseudoelement and notched tapered slot operating at (2.5 to 57) GHz, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, Vol. 67, No. 7, pp. 4357-4366.
13. Dixit A.S., Kumar S. A Survey of Performance Enhancement Techniques of Antipodal Vivaldi Antenna, *IEEE Access.*, 2020, Vol. 8, pp. 45774-45796.
14. Loo X.S., Win M.Z., Yeo K.S. A high gain 60 GHz antipodal Fermi-tapered slot antenna based on robust synthesized dielectric, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2018, Vol. 61, No. 3, pp. 761-765.
15. 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.
16. 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.
17. Kosak R.E., Gevorkyan A.V. Kompaktnyy sverkhshirokopolosnyy izluchatel' Vival'di kardiodnoy formy s pryamougol'nymi impedansnymi vstavkami [Compact cardioid Vivaldi ultra-wideband radiator with rectangular impedance inserts], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 276-284. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-3-276-284.
18. Briqech Z., Sebak A., Denidni T. A. High gain 60 GHz antipodal Fermi tapered slot antenna with sine corrugation, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2014, Vol. 57, No. 1, pp. 6-9.
19. Phalak K.D., Briqech Z., and Sebak A. Ka-band antipodal Fermilinear tapered slot antenna with a knife edge corrugation, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2014, Vol. 57, No. 2, pp. 485-489.
20. Indenbom M.V. Antennnye reshetki podvizhnykh obzornykh RLS. Teoriya, raschet, konstruksii: monografiya [Antenna arrays of mobile surveillance radars. Theory, calculation, designs: monograph]. Moscow: Radiotekhnika, 2015, 416 p.

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

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

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