http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-5-12

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.677.3

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ПРОВОЛОЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

ЮРЦЕВ О.А., ПОПОВ А.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Целью работы является определение свойств сверхширокополосной сканирующей антенной решетки проволочных излучателей. Одиночным элементом решетки является трехмерная антенна Вивальди. Было проведено численное моделирование антенных решеток и одиночных излучателей Вивальди методом интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении с помощью оригинальной программы и программы MMANA. Определены размеры всех элементов одиночного излучателя по критерию согласования и формы диаграммы направленности для работы в диапазоне частот 2–18 ГГц. Описанный вариант антенны по критерию согласования (КСВ < 2) имеет коэффициент перекрытия по частоте 12. Определено сужение полосы частот одиночного излучателя в составе несканирующей и сканирующей решеток в пределах угла 30º. В статье рассматриваются диапазонные свойства антенных решеток в зависимости от параметров излучателей и возможности по фазовому сканированию. Показано, что наибольшей полосой частот по согласованию обладает решетка с минимальным шагом размещения излучателей. В плоской антенной решетке при сканировании в *H*-плоскости полоса частот по критерию согласования уменьшается в 2–3 раза. Показано, что линейная решетка без сканирования имеет коэффициент перекрытия по частоте, равный 6 по критерию согласования излучателей. Этот коэффициент уменьшается с увеличением сектора фазового сканирования. В плоской решетке коэффициент перекрытия по частоте и сектор фазового сканирования меньше, чем в линейной, и уменьшается с ростом числа строк. Приведенная антенная решетка обладает рядом конструктивных преимуществ и может быть использована в системах со сверхширокополосными сигналами.

Ключевые слова: антенная решетка, трехмерный излучатель Вивальди, метод интегральных уравнений, диаграмма направленности, согласование, фазовое сканирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Юрцев О.А., Попов А.А. Сверхширокополосная сканирующая антенная решетка проволочных излучателей. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 5-12.

ULTRA-WIDEBAND SCANNING ANTENNA ARRAY WIRE EMITTERS

OLEG A. YURTSEV, ALEKSEI A. POPOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus

Submitted 21 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The aim of the work is to determine the properties of the ultra-wideband scanning antenna array of wire emitters. A single element of the grid is a three-dimensional antenna Vivaldi. Numerical simulation of antenna arrays and single Vivaldi emitters was carried out by the method of integral equations in the thin-wire approximation using the original program and the MMANA program. The dimensions of all elements of a single emitter are determined by the criterion of matching and the shape of the radiation pattern for operation in the frequency range 2–18 GHz. The described variant of the antenna according to the matching criterion (SWR < 2) has a frequency overlap coefficient of 12. The narrowing of the frequency band of a single emitter in the composition of non-scanning and scanning gratings within the angle of 30 degrees is determined. The article deals with the range properties of antenna arrays depending on the parameters of the emitters and the possibility of phase scanning. It is shown that the greatest frequency band in agreement has a lattice with a minimum step of placement of emitters. In a flat antenna array, when scanning in the *H*-plane, the frequency band according to the matching criterion decreases by 2–3 times. It is shown that the linear lattice without scanning has a frequency overlap coefficient equal to 6 according to the criterion of matching emitters. This ratio decreases as the phase scan sector increases. In a flat lattice, the frequency overlap coefficient and the phase scan sector are smaller than in a linear lattice and decrease with the number of rows. The reduced antenna array has a number of design advantages and can be used in systems with ultra-wideband signals.

Keywords: antenna array, three-dimensional Vivaldi antenna element, element, integral equation method, radiation pattern, impedance matching, phase scan.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

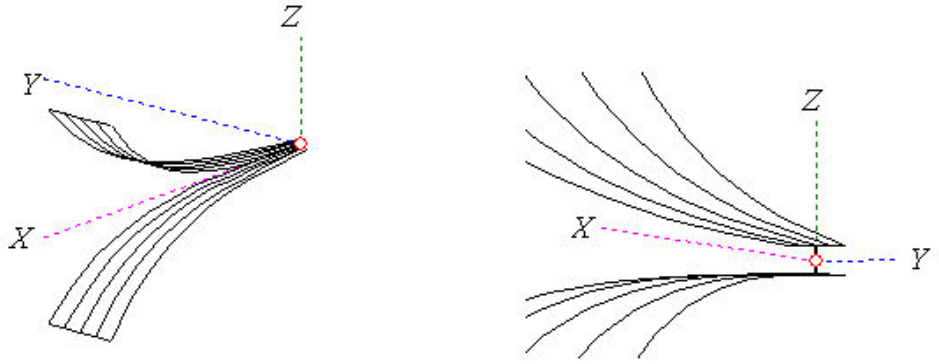
For citation. Yurtsev O.A., Popov A.A. Ultra-wideband scanning antenna array wire emitters. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 5-12.

Введение

Антеннам Вивальди посвящено большое число публикаций, включая монографии [1–4]. Практически во всех работах рассматриваются двумерные антенны Вивальди, в которых металлизация нанесена на диэлектрическую подложку. Такие антенны удобны для применения в диапазоне частот $f > 2$–3 ГГц, в том числе и в антенных решетках. Это обусловлено малыми поперечными размерами излучателя Вивальди в *H*-плоскости, что позволяет выполнить условие единственности главного лепестка диаграммы направленности (ДН) при сканировании в *H*-плоскости в широком угловом секторе в сверхшироком диапазоне частот. Разработаны варианты двумерных антенн Вивальди, согласованные вне антенной решетки в диапазоне частот от единиц ГГц до 30 ГГц. В ряде технических задач, в частности для работы в диапазоне метровых и дециметровых волн, такие антенны неудобны для применения, особенно в качестве излучателей антенных решеток. В этих диапазонах волн в качестве излучателей решеток целесообразно использовать трехмерную антенну Вивальди, выполненную из тонких проводников. Такая конструкция антенны имеет существенно меньшую массу по сравнению с двумерными антеннами Вивальди, выполненными на диэлектрической подложке. Трехмерная проволочная антенна Вивальди схематически показана на рис. 1, *a*. Проводники укладываются на поверхность тонкого гибкого диэлектрика или представляют собой жесткую конструкцию. На рис. 1, *a* показан общий вид антенны, на рис. 1, *b* – способ возбуждения численной модели

антенны (кружком обозначено место введения возбуждающего напряжения на поперечном зонде). В реальной конструкции зонд – это продолжение внутреннего проводника коаксиальной линии.

Трехмерные антенны Вивальди, выполненные из сплошного металла, описаны в отдельных статьях и называются ТЕМ-рупором, хотя профиль металлизации не всегда описывается экспоненциальными функциями. Проволочные антенны Вивальди, насколько удалось проверить по доступным источникам, не описаны. Ниже приводятся результаты численного исследования проволочных трехмерных антенн Вивальди и антенных решеток таких излучателей.



a *b*

Рис. 1. Трехмерная антенна Вивальди: *a* – общий вид; *b* – способ возбуждения
Fig. 1. Three-dimensional antenna Vivaldi: *a* – general view; *b* – method of excitation

Габариты антенны обозначены символами: Lx – вдоль оси X, Ly – вдоль оси Y, Lz – вдоль оси Z. В антенне плоскость XY – H-плоскость, плоскость XZ – E-плоскость. В статье рассматривается антенна, в которой $Ly << Lz$. При этом в линейной решетке обеспечивается возможность разместить излучатели вдоль оси Y с шагом $Dy < \lambda_{min}$, где λ_{min} – минимальная длина волны диапазона частот, в котором обеспечивается согласование излучателей с линиями питания и выполняется условие единственности главного лепестка ДН. В численной модели антенна возбуждается поперечным зондом, в центре которого задается стороннее напряжение частоты f. Зонд показан на рис. 1, *b*, а точка возбуждения обозначена маленьким кружком. Численное моделирование антенных решеток излучателей Вивальди выполнено методом интегральных уравнений (ИУ) в тонкопроволочном приближении [2]. Использовались две программы. Оригинальная программа использовалась для создания файла, описывающего геометрию решетки. Этот файл импортируется в программу MMANA [3], где и происходит расчет электрических характеристик решетки методом ИУ.

Результаты численного моделирования одиночного излучателя

Путем перебора геометрических параметров определены размеры всех элементов антенны по критерию согласования и формы ДН для работы в диапазоне частот 2000–18000 МГц. Получены следующие габаритные размеры: Lx = 100 мм, Ly = 24 мм, Lz = 66 мм. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) в питающей линии с волновым сопротивлением 50 Ом. На рис. 3 показана зависимость от частоты КНД и отношения КНД в направлении максимума ДН и в обратном направлении (*F/B*).

На рис. 4 приведены графики ДН на тех частотах, на которых главный лепесток превосходит боковые лепестки не менее, чем на 2,5 дБ. Как видно, антенна согласована в широком диапазоне частот, причем более широком, чем большинство описанных в литературе двумерных антенн Вивальди, и сравнимом с антенной, описанной в работе [2]. В этой работе за счет усложнения узла возбуждения полоса согласования увеличена до значения 1–18 ГГц. Об изменении в этом диапазоне ДН не сообщается. Описанный вариант антенны (рис. 1) по критерию согласования (КСВ < 2) имеет коэффициент перекрытия по частоте $K_f = f_{max}/f_{min} = 12$.

Режим осевого излучения с уровнем боковых лепестков не более 8–10 дБ в антенне, рис. 1, сохраняется в более узком диапазоне частот (рис. 3, 4), как и в двумерных антеннах Вивальди.

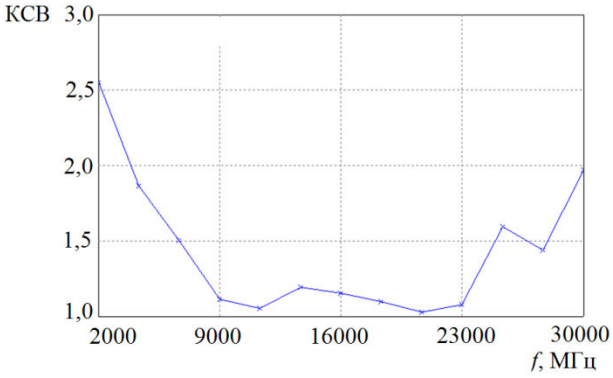


Рис. 2. Зависимость КСВ от частоты
Fig. 2. Dependence of VSWR on frequency

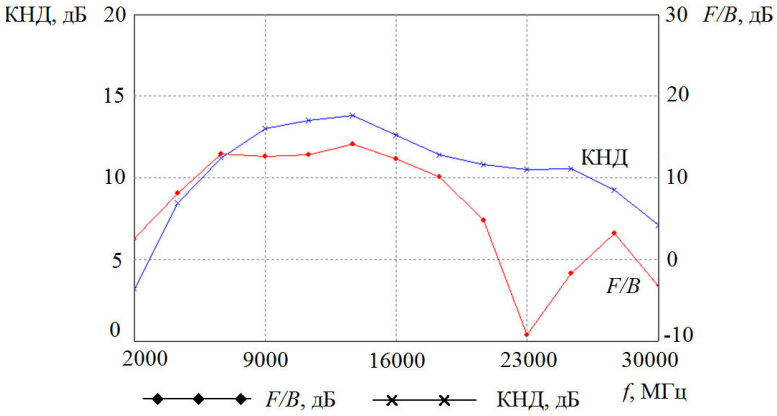
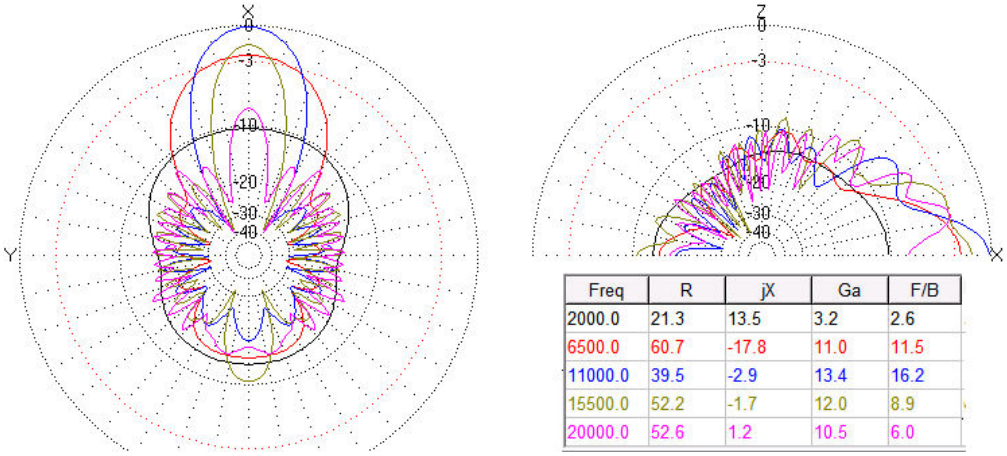


Рис. 3. Зависимость КНД и отношения *F*/*B* от частоты
Fig. 3. Dependence of directivity and *F* to *B* ratio on frequency



Freq	R	jX	Ga	F/B
2000.0	21.3	13.5	3.2	2.6
6500.0	60.7	-17.8	11.0	11.5
11000.0	39.5	-2.9	13.4	16.2
15500.0	52.2	-1.7	12.0	8.9
20000.0	52.6	1.2	10.5	6.0

a *b*

Рис. 4. Диаграмма направленности на разных частотах: *a* – в *H*-плоскости; *b* – в *E*-плоскости
Fig. 4. Radiation pattern at different frequencies: *a* – *H*-plane; *b* – *E*-plane

При применении антенны, показанной на рис. 1, *a*, в качестве излучателя антенной решетки диапазон частот по критерию согласования сужается за счет взаимодействия между излучателями, особенно при фазовом сканировании. Чем меньше частота, тем сильней взаимодействие и больше возрастание КСВ за счет взаимодействия. По критерию сохранения

формы ДН (выполнению условия единственности главного лепестка ДН) диапазон частот также сужается. Причем степень сужения зависит от того, в какой плоскости производится фазовое сканирование.

Линейная и плоская решетки антенн Вивальди

Ниже основные закономерности в антенных решетках проволочных антенн Вивальди иллюстрируются на линейной и плоской решетках с описанным выше излучателем. В линейной решетке излучатели расположены в *H*-плоскости, число излучателей $Ny = 10$. В плоской решетке вдоль оси *Y* (в строке) число излучателей $Ny = 10$, вдоль оси *Z* (в столбце) число излучателей $Nz = 3$. Эти антенные решетки схематически показаны на рис. 5.

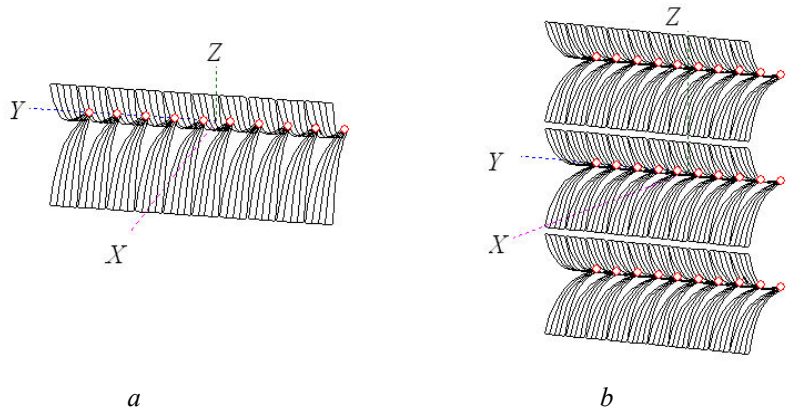


Рис. 5. Вид решетки антенн Вивальди: *a* – линейной; *b* – плоской
Fig. 5. Drawing Vivaldi antenna arrays: *a* – linear; *b* – flat

Для увеличения сектора углов фазового сканирования шаг размещения излучателей в строках и столбцах сделан равным минимально возможному значению $Dy = 25$ мм, $Dz = 70$ мм, т. е. почти равным габаритам излучателя вдоль осей *Y* и *Z*. Численный анализ показал, что при нулевом угле сканирования полоса частот по критерию согласования (КСВ < 2) линейной решетки равна 2000–12000 МГц. Диаграммы направленности в *H*-плоскости на частотах 2000 и 12000 МГц показаны на рис. 6. Амплитудное распределение возбуждения излучателей в решетке равномерное.

На рис. 6 обозначено: *R, X* − активная и реактивная части входного сопротивления излучателя с номером 1; *Ga* − коэффициент направленного действия (КНД) решетки; *F/B*− отношение КНД в направлении максимума ДН и в обратном направлении.

При сканировании в *H*-плоскости диапазон частот, в котором выполняется условие единственности главного лепестка, сужается. Кроме того, за счет взаимодействия между излучателями изменяется их входное сопротивление. В результате КСВ растет, полоса частот согласования уменьшается. Степень этих изменений растет при увеличении угла сканирования и шага размещения излучателей в решетке и зависит от частоты. Для иллюстрации этих закономерностей на рис. 7 приведены графики зависимости КСВ от номера излучателя в решетке для угла сканирования 30° для разных частот и двух значений шага Dy. Излучатель с номером 1 по оси *Y* расположен слева на рис. 4.

Численный анализ показал, что наибольшей полосой частот по согласованию обладает решетка с минимальным шагом размещения излучателей. Рис. 8, *a* иллюстрирует этот вывод. В плоской решетке (рис. 4, *b*) полоса частот уменьшается за счет уменьшения верхней частоты. Это связано с тем, что в плоскости столбцов шаг решетки значительно больше, чем в плоскости строк, и условие единственности главного лепестка ДН, прежде всего, нарушается в плоскости столбцов.

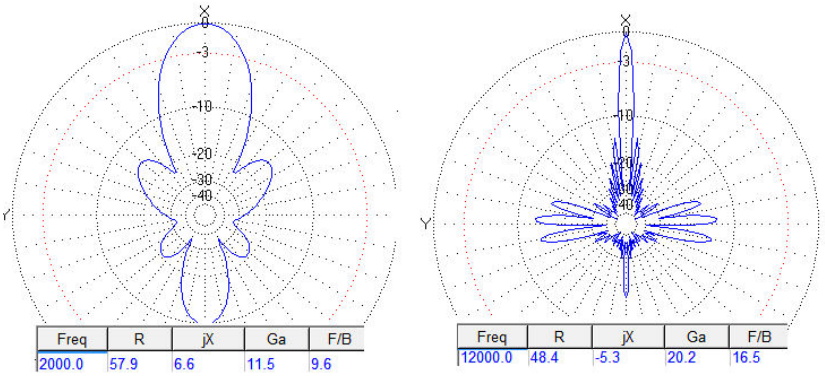
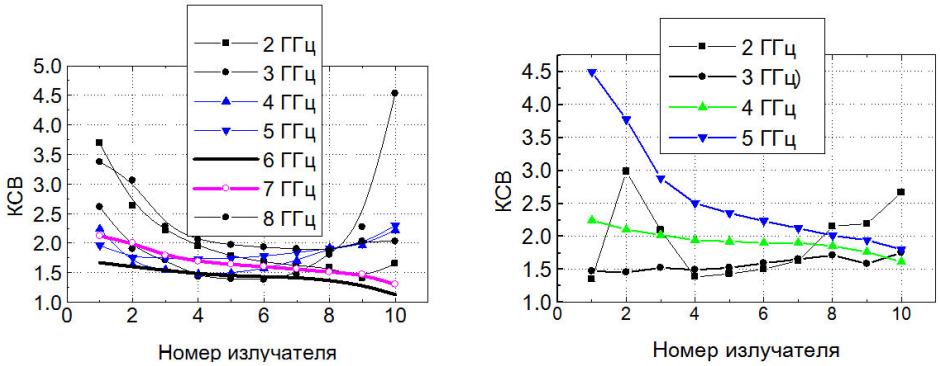
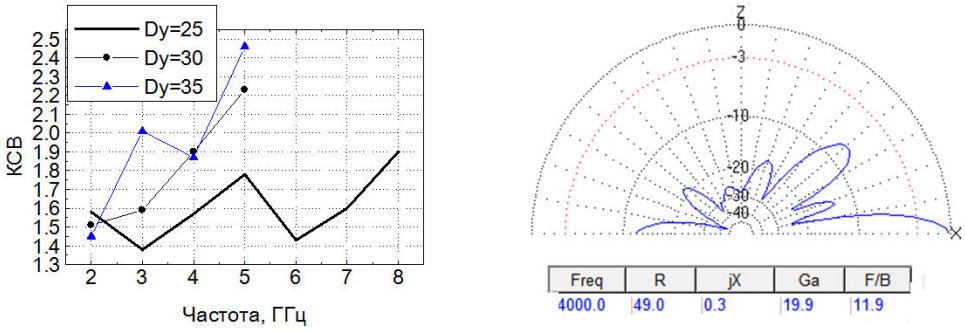


Рис. 6. ДН линейной решетки в *H*-плоскости на двух частотах в логарифмическом масштабе
Fig. 6. Radiation pattern of a linear antenna array in the *H*-plane at two frequencies on a logarithmic scale



a *b*

Рис. 7. Зависимость КСВ от номера излучателей в линейной решетке для угла сканирования 30°для разных частот и двух значений шага: *a* – *Dy* = 25 мм; *b* – *Dy* = 30 мм
Fig. 7. Dependence of SWR on the number of emitters in the linear array for the scanning angle of 30° for different frequencies and two step values: *a* – *Dy* = 25 mm; *b* – *Dy* = 30 mm



a *b*

Рис. 8. Результаты моделирования: *a* – КСВ для линейной решетки при угле сканирования 30°, для разных шагов в решетке, *b* – ДН плоской решетки в плоскости столбцов на частоте 4 ГГц
Fig. 8. Simulation results: *a* – SWR for linear lattice at a scanning angle of 30°, for different steps in the lattice, *b* – the bottom of a flat lattice in the plane of columns at a frequency of 4 GHz

В рассматриваемом примере решетки (рис. 4, *b*) шаг *Dz* = 70 мм. При этом условие единственности главного лепестка в плоскости столбцов выполняется до максимально частоты $f_{\max}$ =4 ГГц. На этой частоте максимально возможный угол сканирования в плоскости столбцов равен 8. На рис. 8, *b* показана ДН в плоскости столбцов на частоте 4 ГГц при нулевом угле сканирования в обеих плоскостях. При уменьшении размера апертуры излучателя вдоль оси *Z* максимальная частота $f_{\max}$ уменьшается, но при этом уменьшается и минимальная частота $f_{\min}$ по критерию согласования.

Заключение

Описаны результаты численного моделирования сверхширокополосной проволочной трехмерной антенны Вивальди и решетки таких антенн. Показано, что такая антенна, кроме очевидных конструктивных достоинств (особенно в диапазоне частот $f < 2000$ МГц), имеет полосу частот, в которой обеспечивается согласование, не меньше, а для большинства описанных в литературе вариантов – больше, чем в двумерных антеннах Вивальди. Уровень бокового и заднего излучения примерно такой же, как в двумерных антеннах Вивальди. Одиночный исследованный вариант излучателя по критерию согласования имеет полосу частот 2–30 ГГц, в составе несканирующей линейной решетки эта полоса сужается и составляет 2–12 ГГц. При сканировании в угловом секторе ± 30° полоса сужается до значения 2–8 ГГц. В плоской решетке при сканировании в *H*-плоскости полоса частот согласования уменьшается в 2–3 раза.

Список литературы

1. DurgaIndira N., Madhav B.T.P., Balaji K., Rajagopalarao B., Venkata Kishore K. Multiband Vivaldi Antenna for *X* and *Ku* band Applications. *Internatoinal Journal of Advanced Networking and Applications*. 2012;3(5):1375-1378.
2. Agahi M.H.H., Abiri H., Mohajeri F. Investigation of a New Idea for Antipodal Vivaldi Antenna Design. *Internatoinal Journal of Computer and Electrical Engineering*; 2011;3(2):277-281. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.327
3. Митра Р. *Вычислительные методы в электродинамике*. Москва: Мир; 1977.
4. Гончаренко И.В. *Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA*. Москва: РадиоСофт; 2002.

References

1. DurgaIndira N., Madhav B.T.P., Balaji K., Rajagopalarao B., Venkata Kishore K. Multiband Vivaldi Antenna for *X* and *Ku* band Applications. *Internatoinal Journal of Advanced Networking and Applications*. 2012;3(5):1375-1378.
2. Agahi M.H.H., Abiri H., Mohajeri F. Investigation of a New Idea for Antipodal Vivaldi Antenna Design. *Internatoinal Journal of Computer and Electrical Engineering*; 2011;3(2):277-281. DOI: 10.7763/IJCEE.2011.V3.327
3. Mitra R. [*Numerical Methods in Computational Electrodynamics*]. Moscow: Mir; 1977. (In Russ.)
4. Goncharenko. I.V. [*Computer simulation of antennas. All about the program MMANA*]. Moscow: RadioSoft; 2002. (In Russ.)

Вклад авторов

Юрцев О.А. разработал конструкцию антенны, разработал оригинальную программу для проведения численного моделирования, выполнил моделирование антенной решетки.

Попов А.А. выполнил моделирование одиночного излучателя и антенной решетки.

Authors contribution

Yurtsev O.A developed the design of the antenna, developed an original program for numerical simulation, conducted a simulation of the antenna array.

Popov A.A. performed simulation of a single emitter and antenna array.

Сведения об авторах

Юрцев О.А. (1933–2019), д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники БССР.

Попов А.А., инженер кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Informationabouttheauthors

Yurtsev O.A. (1933–2019), D.Sci, professor, Honored worker of Science and Technology of BSSR.

Popov A.A., engineer of Department of Information Radiotechnologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-27;
e-mail: a.popov@bsuir.by
Попов Алексей Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-17-293-89-27;
e-mail: a.popov@bsuir.by
Popov AlekseiAleksandrovich