

УДК 621.396.677.31

В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков, М.В. Крутиков

Широкополосные антенные решетки с элементами Вивальди для систем радиомониторинга

Приведена оценка широкополосности антенных решеток с элементами Вивальди для различных вариантов расположения элементов в антенной решетке.

Ключевые слова: антenna Вивальди, антенная решетка, широкополосность.

С развитием систем радиомониторинга все чаще используются широкополосные антенные решетки (АР) [1], в связи с чем в последнее время важной задачей является расширение полосы рабочих частот таких антенных систем. Одним из препятствий на этом пути является то, что при определенных соотношениях длины волны и расстояния между элементами АР диаграмма направленности (ДН) решетки искажается за счет возникновения дополнительных дифракционных максимумов, чем ограничивается рабочая полоса частот.

Характеристикой полосы пропускания антенной системы является коэффициент перекрытия по частоте K_f , под которым понимается отношение верхней f_{\max} и нижней f_{\min} граничных частот полосы при сохранении основных характеристик ДН АР [1]:

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}. \quad (1)$$

Широкополосными обычно считаются системы с K_f более 1,25 [1]. Диаграмма направленности АР $f(\theta, \varphi)$, описывает зависимость амплитуды излучения от направления излучения от углов θ и φ в сферической системе координат. Обычно она представляется в виде произведения ДН элемента решетки $F_1(\theta, \varphi)$ на так называемый множитель решетки $F_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ [2]:

$$f(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) F_{\Sigma}(\theta, \varphi). \quad (2)$$

В случае расположения элементов в АР рядами в виде M строк и N столбцов, множитель решетки определяется следующим выражением:

$$F_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{m,n=1}^{M,N} A_{mn} e^{i(\psi_{mn} + \psi^p_{mn})}, \quad (3)$$

$$\psi^p_{mn} = k(X_{mn} \cos \varphi + Y_{mn} \sin \varphi), \quad (4)$$

где m, n – индекс, показывающий расположение элемента АР в строке и столбце соответственно; A_{mn} – амплитуда возбуждения mn -го элемента АР; ψ_{mn} – фаза возбуждения mn -го элемента АР; ψ^p_{mn} – дополнительный фазовый набег относительно некоторой точки отсчета в элементе m, n за счет пространственного расположения элементов при излучении в направлении θ, φ ; X_{mn} , Y_{mn} – координаты излучателей в решетке.

В предлагаемой статье исследуются возможности увеличения K_f плоской АР путем изменения расположения ее элементов, в качестве которых использованы антенны Вивальди (при сохранении площади АР).

Антенна Вивальди, имеющая в настоящее время широкое распространение [4], представляет собой прямоугольную плоскую диэлектрическую пластинку длиной L и шириной W с проводящим покрытием специальной конфигурации на обеих ее сторонах, как это показано на рис. 1. Такая антенна имеет однородную ДН с максимумом в направлении оси OZ. Описание конструкции и характеристики этой антенны приведены в работе [3]. Максимальная длина волны, принимаемая антенной Вивальди, – λ_{\max} , и соответственно АР из таких элементов определяется ее размером W и не может быть больше чем [4]:

$$\lambda_{\max} = 2W. \quad (5)$$

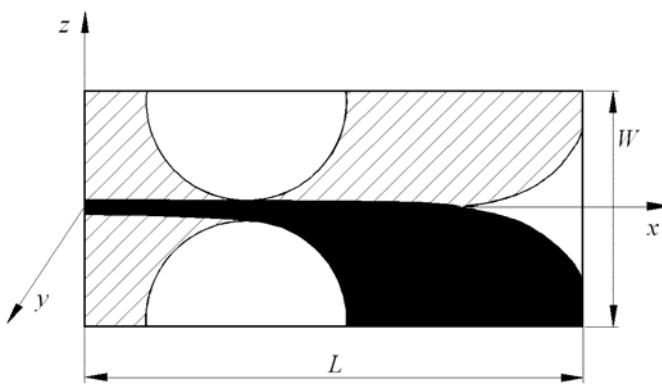


Рис. 1. Общий вид антенны Вивальди

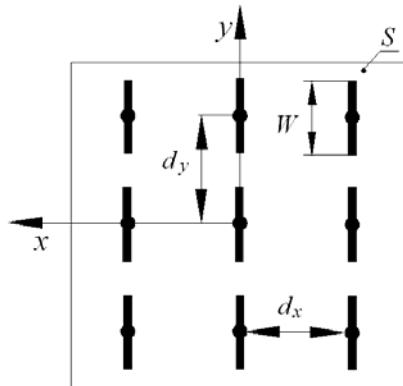


Рис. 2. Расположение элементов АР в узлах прямоугольной сетки

Наибольшее распространение получили плоские АР, в которых антенны Вивальди расположены параллельными рядами [2]. На рис. 2 показан фрагмент такой решетки, состоящей из девяти элементов, площадь которого равна S , с видом со стороны торцов элементов, т.е. со стороны излучения (приема) с указанием соответствующих расстояний между «строками» и «столбцами» элементов. Как видно из рис. 2, элементы АР расположены в узлах прямоугольной сетки.

Для расширения полосы пропускания необходимо увеличить максимальную длину волны λ_{\max} и уменьшить минимальную длину волны λ_{\min} , принимаемой АР. Следовательно, для расширения полосы рабочих частот необходимо увеличивать размер W , который не может быть больше шага решетки d_y (как видно из рис. 2). Стремление увеличить шаг решетки d приводит к возникновению дифракционных максимумов. Условия возникновения дифракционных максимумов для АР с расположением элементов по прямоугольной сетке записываются в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned} d_x/\lambda &\leq 1/(\sin\theta_{z\max} + 1), \\ d_y/\lambda &\leq 1/(\sin\theta_{y\max} + 1), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\theta_{z\max}$ и $\theta_{y\max}$ — максимальные углы отклонения луча в плоскостях XOZ и ZOY , а λ — длина волны.

Дифракционные максимумы ДН АР возникают тогда, когда длина волны становится меньше шага АР, что видно из формулы (6) для $\theta_{z\max} = \theta_{y\max} = 0^\circ$. Если $\theta_{z\max} = \theta_{y\max} = 90^\circ$, то $d/\lambda \leq 0,5$. Таким образом, в верхней части диапазона полоса рабочих частот АР ограничивается ее шагом $\lambda_{\min} = d$, а в нижней части — шириной антенны Вивальди $\lambda_{\max} = 2W$.

При отсутствии дифракционных максимумов коэффициент перекрытия K_f АР достигает максимума, если отсутствует отклонение максимума ДН АР от направления $\theta_{z\max} = \theta_{y\max} = 0^\circ$. При отклонении максимума ДН АР до значения $\theta_{z\max} = \theta_{y\max} = 90^\circ$, согласно (6), коэффициент перекрытия K_f АР пропорционально уменьшается в два раза. В дальнейшем будем рассматривать только максимальное значение K_f АР, т.е. для случая $\theta_{z\max} = \theta_{y\max} = 0^\circ$.

Минимальное значение шага решетки ограничено взаимным электродинамическим влиянием элементов. В работах [5–7] приводятся экспериментальные данные и рекомендации, в соответствии с которыми минимальное расстояние между элементами, расположенными по прямоугольной сетке, должно быть более полуволны $\lambda_{\max}/2$ на нижней граничной частоте рабочего диапазона частот или, учитывая соотношение (5), должно равняться $2W$. С учетом этих рекомендаций и соотношения (5) расстояние между элементами АР равно $d_x = d_y = d$.

Таким образом, полоса рабочих длин волн АР определяется соотношением

$$2W \leq \lambda \leq d. \quad (7)$$

Полагая, что максимальная величина $W = d$, коэффициент перекрытия АР с антеннами Вивальди, расположенными в узлах прямоугольной сетки, составляет величину $K_f \leq 2$.

Авторами был проведен анализ других возможных вариантов расположения антенных элементов АР. Наилучший результат был получен для расположения элементов в АР в узлах треугольной сетки, предложенной в [1], с указанным в [3] шагом $d = 1,2\lambda_{\min}$, где λ_{\min} – длина волны на верхней граничной частоте рабочего диапазона частот. Расположение элементов в фрагменте АР из семи элементов с площадью S показано на рис. 3. В этом случае условие отсутствия дифракционных максимумов записывается в следующем виде [2]:

$$d/\lambda \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \left[1/(\sin \theta_{\max} + 1) \right]. \quad (8)$$

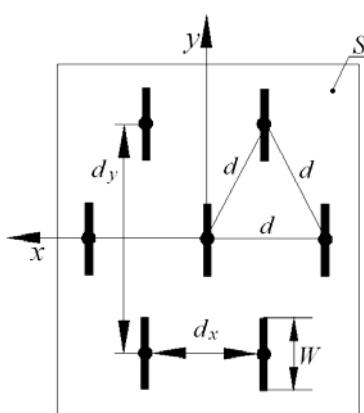


Рис. 3. Расположение элементов АР в узлах треугольной сетки

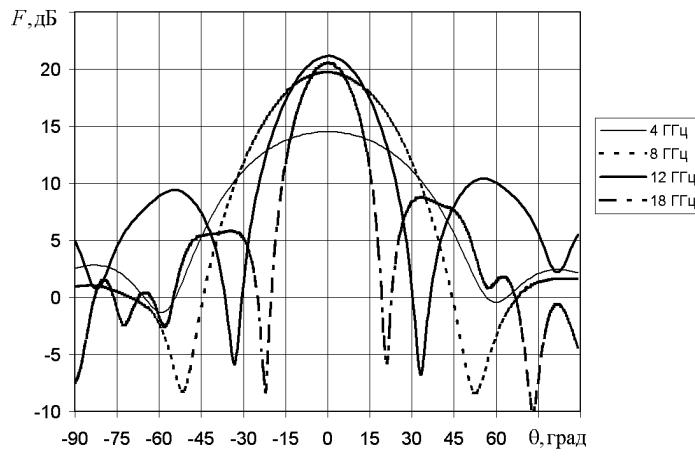


Рис. 4. Расчетные ДН АР из семи элементов, расположенных в узлах треугольной сетки

Из сравнения (6) и (8) следует, что максимальный шаг расположения элементов АР в узлах треугольной сетки в 1,15 раза больше шага при расположении элементов АР в узлах прямоугольной сетки. Как видно из рис. 3, при расположении элементов АР в узлах (вершинах) равностороннего треугольника шаги решетки вдоль горизонтальной оси d_x и вертикальной оси d_y связаны между собой следующими соотношениями:

$$d_y = 2d_x \sin 60^\circ = 1,73d_x. \quad (9)$$

Кроме этого, в работе [3] для расположения элементов АР рекомендуется максимальный шаг, при котором отсутствуют дифракционные максимумы, величиной $d_x = 1,2\lambda_{\min}$. Тогда шаг по оси Y согласно (9) равен $d_y = 2,09\lambda_{\min}$. В этом случае на основании выражения (5) для АР можно использовать антенны Вивальди с шириной

$$W = d_y = 2\lambda_{\min} = \lambda_{\max}/2. \quad (10)$$

При отсутствии дифракционных максимумов максимальный коэффициент перекрытия по частоте АР равен

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = 4. \quad (11)$$

Для проверки полученной оценки величины $K_f = 4$ были рассчитаны диаграммы направленности в частотном диапазоне 4–16 ГГц АР из семи элементов, расположенных в узлах треугольной сетки. Формы ДН приведены на рис. 4 и подтверждают, что ДН на всех частотах рабочего диапазона АР (4–18 ГГц) не имеют дифракционных максимумов, сохраняя необходимую направленность. Результаты предварительных измерений такой антенной решетки показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных ДН [8].

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование антенн Вивальди, расположенных в АР по треугольной сетке с шагом $d = 1,2\lambda_{\min}$, увеличивает широкополосность АР до двух раз по сравнению с их расположением по прямоугольной сетке.

2. Коэффициент перекрытия по частоте АР с антеннами Вивальди, расположенными в узлах треугольной сетки, не менее $K_f = 4$.

3. Расположение антенн Вивальди по треугольной сетке в АР позволяет уменьшить (до 27%) количество элементов при сохранении той же площади решетки.

Литература

1. Зарубежные радиоэлектронные средства / под ред. Ю.М. Перунова: В 4 кн. Кн. 3: Антенны. – М.: Радиотехника, 2010. – 400 с.
2. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны: учеб. для вузов. – М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
3. Куприц В.Ю. Оптимизация расположения антенных элементов Вивальди в широкополосных антенных решетках / В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 45–49.
4. Endfire Tapered Slot Antennas on Dielectric Substrates / K.S. Yngvesson, D.H. Schaubert, T.L. Korzeniowski et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1985. – Vol. SP-33, № 12. – P. 1392–1400.
5. John Volakis. Antenna Engineering Handbook. – Fourth Edition. – N.Y.: McGraw-Hill, 2007. – 1872 p.
6. Broadband Dual Polarized Antenna Arrays for Mobile Communication Applications / S. Balling, M. Hein, M. Hennhofer, G. Sommerkorn // 33 rd European Microwave Conference. – Munich, 2003. – P. 927–930.
7. Костиков Г.А. Исследование эффектов взаимного влияния излучателей Вивальди / Г.А. Костиков, М.И. Сугак // 6-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и экологии (EMC-2005): матер. симпозиума. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – С. 149–151.
8. Куприц В.Ю. Антenna решетка из элементов Вивальди, работающая в сантиметровом диапазоне / В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков // Сборник докладов научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – С. 134–138.

Куприц Владимир Юрьевич

Мл. науч. сотрудник НИИ радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-89

Эл. почта: tomskvlad@mail.ru

Мещеряков Александр Алексеевич

Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-34-55

Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Крутиков Михаил Владимирович

Зав. лабораторией распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-69

Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Kuprith V.U., Mescheryakov A.A., Krutikov M.V.

Broadband antenna array with Vivaldi elements for radio monitoring systems

The paper estimates broadband antenna array with Vivaldi elements for various variants of the arrangement of elements in the antenna array.

Keywords: Vivaldi antenna, antenna array, broadband.