

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:** антенна 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  $\theta$  и  $\varphi$  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:

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

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

где  $m, n$  – индекс, показывающий расположение элемента АР в строке и столбце соответственно;  $A_{mn}$  – амплитуда возбуждения  $mn$ -го элемента АР;  $\psi_{mn}$  – фаза возбуждения  $mn$ -го элемента АР;  $\psi_{mn}^P$  – дополнительный фазовый набег относительно некоторой точки отсчета в элементе  $m, n$  за счет пространственного расположения элементов при излучении в направлении  $\theta, \varphi$ ;  $X_{mn}$ ,  $Y_{mn}$  – 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 однонаправленную ДН с максимумом в направлении оси OZ. Описание конструкции и характеристики этой антенны приведены в работе [3]. Максимальная длина волны, принимаемая антенной Вивальди, –  $\lambda_{\max}$ , и соответственно АР из таких элементов определяется ее размером  $W$  и не может быть больше чем [4]:

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

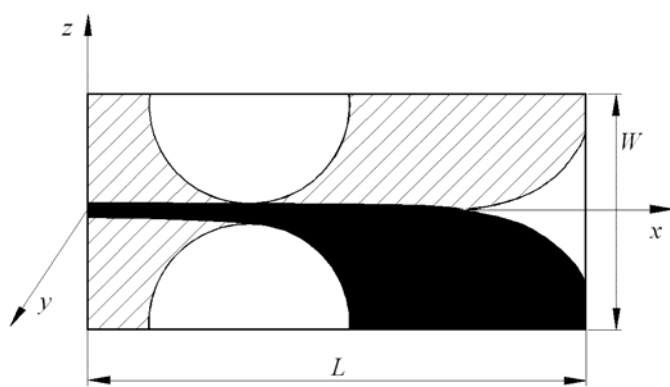


Рис. 1. Общий вид антенны Вивальди

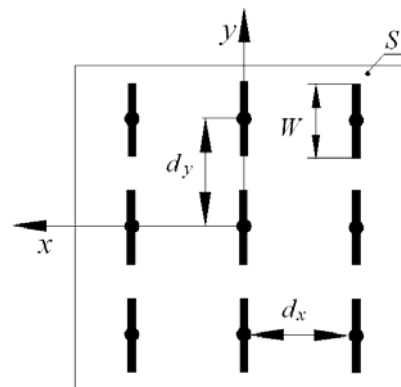


Рис. 2. Расположение элементов АР в узлах прямоугольной сетки

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  $\lambda_{\max}$  и уменьшить минимальную длину волны  $\lambda_{\min}$ , 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  $\lambda$  – 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  $\lambda_{\min}$  – 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]:

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

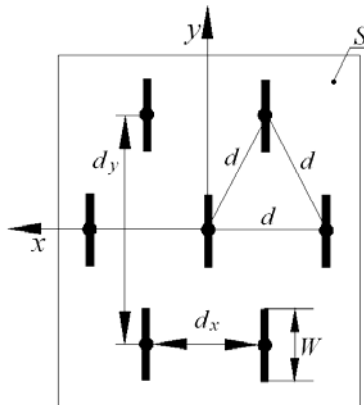


Рис. 3. Расположение элементов АР в узлах треугольной сетки

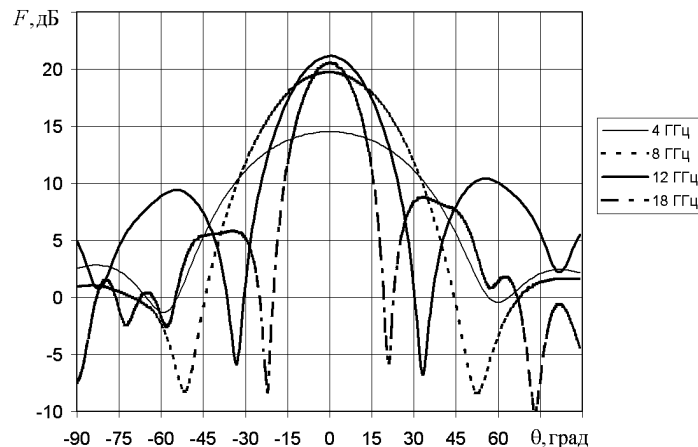


Рис. 4. Расчетные ДН АР из семи элементов, расположенных в узлах треугольной сетки

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 (ЕМС-2005): матер. симпозиума. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – С. 149–151.
8. Куприц В.Ю. Антенная 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 ОмТГУ, 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: gwplab@ms.tusur.ru

#### **Крутиков Михаил Владимирович**

Зав. лабораторией распространения радиоволн НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-39-69

Эл. почта: gwplab@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.