

УДК 621.396.677.31

В.Ю. Куприц, А.А. Мещеряков

## Оптимизация расположения антенных элементов Вивальди в широкополосных антенных решетках

Проведено исследование зависимости направленных свойств антенной решетки на основе элементов Вивальди от их числа и расположения. Изготовлен макет такой решетки с оптимальным расположением элементов для приема сигналов линейной поляризации, приведены его характеристики.

**Ключевые слова:** антенная решетка, антенна Вивальди, оптимизация.

Радиотехнические системы имеют тенденцию к расширению рабочего диапазона частот, что приводит к поиску новых конструкций антенн, в частности антенных решеток (АР), обладающих наилучшими соотношениями между параметрами диаграммы направленности (ДН), к которым относят ширину ДН по половинной мощности, уровень боковых лепестков и коэффициент направленного действия (КНД) [1].

В плоских эквидистантных АР элементы чаще всего располагают в узлах прямоугольной или треугольной сетки, как показано на рис. 1 [2]. Расстояния между излучателями выбирают в пределах одной длины волны на верхней границе диапазона частот, что позволяет формировать ДН с одним главным лучом и низким уровнем боковых лепестков. В [3] приводится методика расчета КНД АР, состоящей из изотропных излучателей, и указывается, что усиление принимает максимальное значение практически независимо от числа излучателей при  $d \approx 0,9\lambda$ .

Получить необходимые КНД и уровень боковых лепестков можно используя неравномерное распределение амплитуды в раскрыве АР (например, Дольф-Чебышевское) или применяя неэквидистантное расположение элементов АР [1]. Однако построенные по этим условиям АР имеют небольшой диапазон рабочих частот.

При использовании прямоугольной сетки для расположения элементов АР дифракционные максимумы высших порядков отсутствуют, если расстояние между элементами АР в направлении координатных осей, приведенных на рис. 2, удовлетворяет условиям [2]:

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

где  $\lambda$  – длина волны,  $\theta_{z \max}$  и  $\theta_{y \max}$  – максимальные углы отклонения луча в плоскостях  $XOZ$  и  $XOY$ .

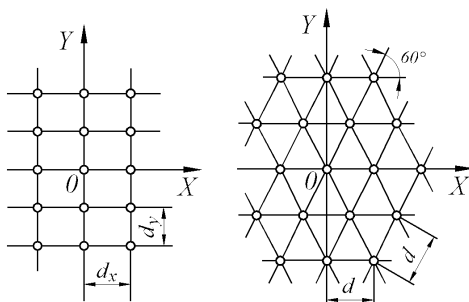


Рис. 1. Способы расположения элементов АР

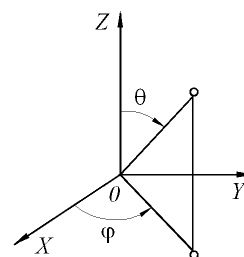


Рис. 2. Системы координат

Для треугольной сетки условие отсутствия дифракционных максимумов имеет вид [2]

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

Использование треугольной сетки позволяет увеличить расстояние между элементами АР в  $\frac{2}{\sqrt{3}}$  раз по сравнению с прямоугольной, что составляет 15%, и приводит к соответствующему уменьшению общего количества элементов АР при одинаковом раскрыве.

Использование элементов АР, имеющих КНД порядка 6–8 дБ, позволяет увеличить шаг решетки [2] при одновременном уменьшении их общего количества при заданных параметрах ДН.

Целью настоящей работы является нахождение оптимального расположения элементов Вивальди в малоэлементной решетке, обеспечивающего одновременно высокий КНД и низкий уровень боковых лепестков.

Был выбран вариант антенны Вивальди [4], представляющий собой печатную плату, изготовленную методом фотолитографии из двухстороннего фольгированного диэлектрика. Общий вид антенны длиной  $L$  и шириной  $W$  показан на рис. 3. Антенна Вивальди выполнена в виде двух полосковых проводников, расположенных на противоположных сторонах печатной платы. На одной стороне платы расположена часть антенны, показанная на рис. 3 штриховкой, на другой стороне – показанная черным цветом. Между этими двумя частями антенны находится излучающая щель, расширяющаяся по экспоненциальному закону вдоль оси  $X$ .

Антенна Вивальди относится к классу антенн бегущей волны, для которых фазовая скорость волны  $v_\phi$  меньше скорости света и которые формируют луч в направлении оси  $OX$ . Вектор поляризации электрического поля, излучаемого антенной Вивальди, направлен вдоль оси  $OZ$ . КНД антенны Вивальди определяется по формуле [5]

$$D \approx 10L/\lambda_0, \quad (3)$$

где  $L \approx (3-8)\lambda_0$  – длина антенны;  $\lambda_0$  – длина волны в середине рабочего диапазона частот. Ширина антенны  $W$  составляет  $\lambda_0/2$ , это обеспечивает широкий диапазон рабочих частот.

Толщина диэлектрической подложки  $t$  выбирается для заданной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  по формуле [4]

$$t_{eff}/\lambda_0 = (\sqrt{\varepsilon} - 1)t/\lambda_0, \quad (4)$$

где  $t_{eff}/\lambda_0$  – эффективная толщина диэлектрической подложки, нормированная на  $\lambda_0$ . Значение  $t_{eff}/\lambda_0$  должно находиться в интервале от 0,0025 до 0,028. Нижнее значение соответствует минимуму боковых лепестков, а верхнее – максимуму КНД. При построении антенны Вивальди было выбрано значение  $t_{eff}/\lambda_0 = 0,0086$ . В качестве диэлектрической подложки был выбран материал «Брикор» с толщиной подложки 0,5 мм, толщиной медного слоя 0,035 мм и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2,3$ .

С помощью расчетов и компьютерного моделирования была спроектирована антенна Вивальди для работы в диапазоне частот 8–18 ГГц. Трехмерная ДН, совмещенная с изображением антенны Вивальди, показана на рис. 4. В качестве иллюстрации на рис. 5 показана ДН в горизонтальной плоскости ( $ХОУ$ ) и вертикальной поляризации на частотах 8 и 18 ГГц.

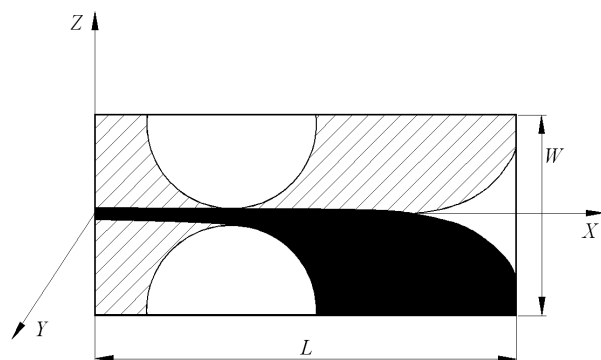


Рис. 3. Общий вид антенны Вивальди

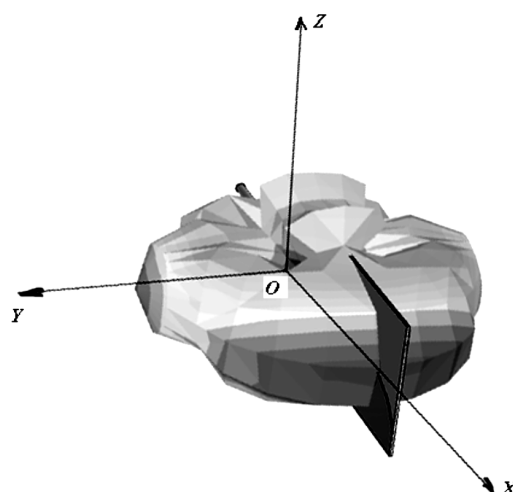


Рис. 4. Трехмерная ДН антенны Вивальди на частоте 8 ГГц

Для измерения КСВН и ДН было изготовлено несколько антенн Вивальди. Внешний вид одной из них показан на рис. 6.

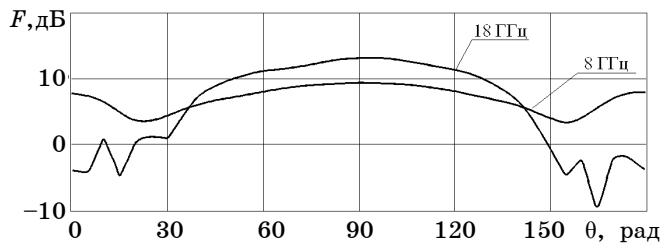


Рис. 5. ДН в горизонтальной плоскости при вертикальной поляризации

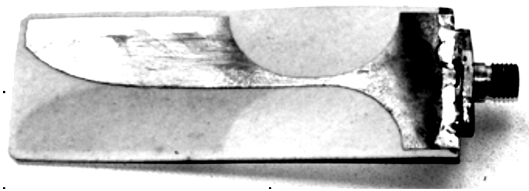


Рис. 6. Антенна Вивальди

Измерение частотных характеристик КСВН и ДН было проведено на установке для автоматизированных измерений параметров антенн с использованием компьютера и панорамного измерителя [6]. Результаты измерения частотной зависимости КСВН антенны Вивальди приведены на рис. 7, ДН в горизонтальной плоскости для вертикальной поляризации на трех частотах приведены на рис. 8.

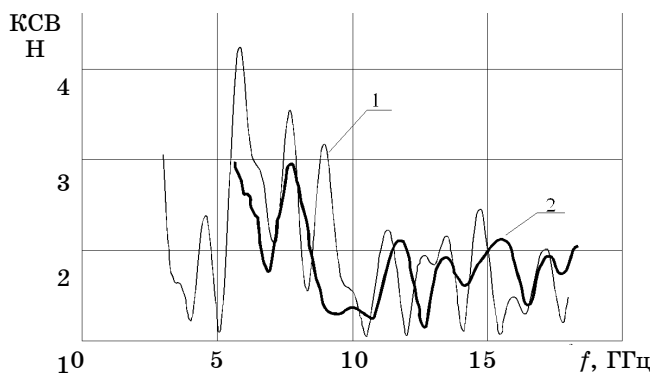


Рис. 7. КСВН антенны Вивальди: 1 – расчетный; 2 – измеренный

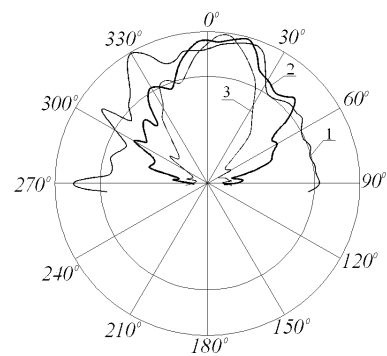


Рис. 8. Нормированные ДН: 1 – 8 ГГц; 2 – 12 ГГц; 3 – 18 ГГц

Были проведены моделирование и анализ возможного расположения антенн Вивальди в АР с небольшим количеством элементов, которые устанавливались для приема сигналов линейной поляризации. Оптимальное расположение элементов АР было для семиэлементной решетки получено при их установке в узлы треугольной сетки, как показано на рис. 9.

Для определения оптимального значения расстояния  $d$  (шага в треугольной сетке) между элементами АР были проведены расчеты параметров ДН АР с помощью пакета специализированных программ. Частотная зависимость КНД для различных значений  $d$  приведена на рис. 10.

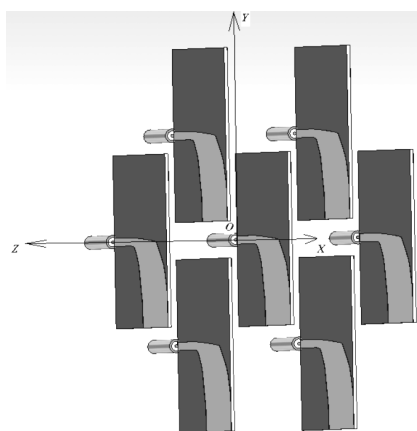


Рис. 9. Расположение элементов Вивальди в АР

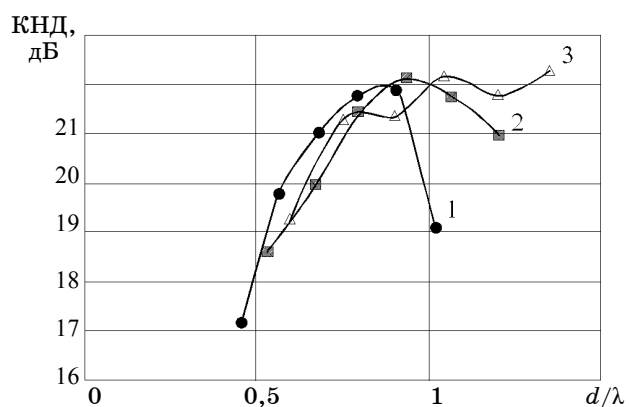


Рис. 10. Частотная зависимость КНД для: 1 –  $d = 17,5$  мм; 2 –  $d = 20$  мм; 3 –  $d = 22,5$  мм

На рис. 11 приведены частотные зависимости уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН АР в плоскостях  $XOZ$  и  $XOY$ .

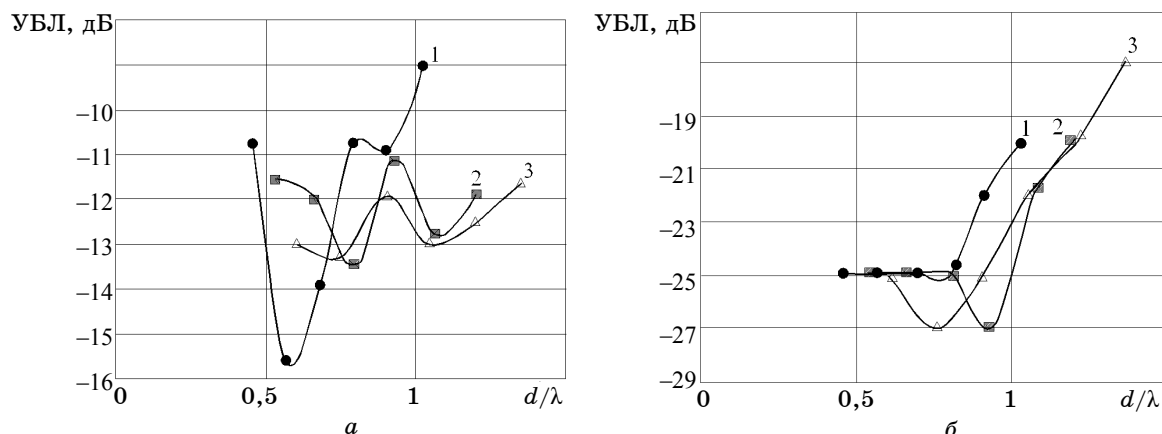


Рис. 11. Частотная зависимость УБЛ ДН в плоскости  $XOZ$  (а) и  $XOY$  (б) для:  
 1 –  $d = 17,5$  мм; 2 –  $d = 20$  мм; 3 –  $d = 22,5$  мм

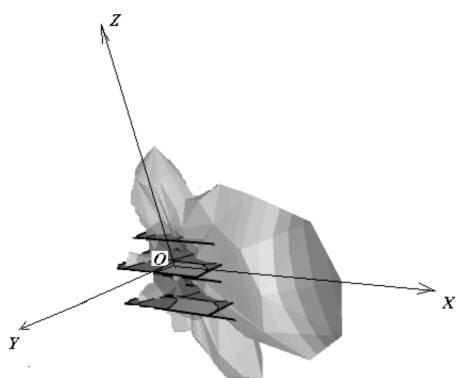


Рис. 12. Трехмерная ДН АР из семи элементов Вивальди

Как видно из рис. 9–11, наилучшее соотношение КНД и уровня боковых лепестков достигается при  $d = 20$  мм. Это соответствует значению шага  $1,2\lambda_B$ , где  $\lambda_B$  – длина волны на верхней границе рабочего диапазона частот, что заметно превышает рекомендованное значение в [3].

На рис. 12 показана расчетная трехмерная ДН, совмещенная с изображением антенны Вивальди, для частоты 9 ГГц. Расчетная ширина ДН такой АР по половинной мощности на частоте 9 ГГц составляет 16 град в горизонтальной плоскости и 35 град в вертикальной плоскости.

Для проверки полученных результатов был изготовлен макет АР. Антенные элементы были установлены на металлическом экране с размерами  $150 \times 150$  мм, как показано на рис. 13.

Антенные элементы (АЭ) были соединены между собой с помощью делителей мощности (ДМ) и сумматора (СМ), которые составляют диаграммообразующую схему (ДОС), как показано на рис. 14.

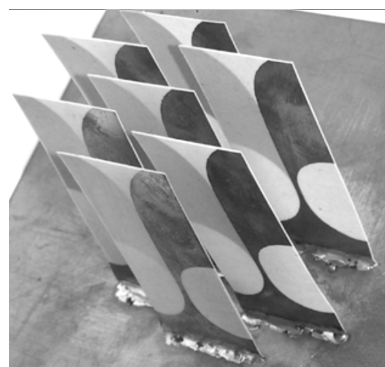


Рис. 13. Макет антенной решетки на основе антенных элементов Вивальди

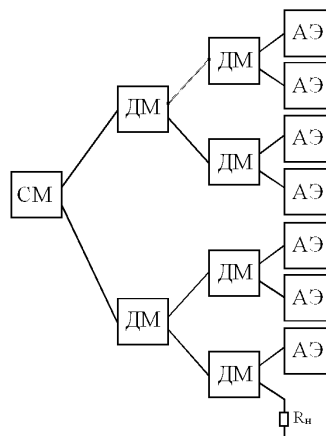


Рис. 14. Диаграммообразующая схема антенной решетки

Измерение характеристик ДН макета АР проводилось в полевых условиях. Трасса протяженностью 300 м располагалась над полем, по сторонам которого располагались лесные массивы. Высота травы и отдельных кустарников не превышала 0,5 м. Передающий пункт в виде импульсной радиолокационной станции располагался на высоте 4 м над землей. При измерениях макет АР был закреплен на поворотном устройстве высотой 1,3 м от поверхности земли. Результаты измерений ДН в горизонтальной плоскости показаны на рис. 15. Для сравнения на этом же рисунке приведена расчетная ДН.

Как видно из рис. 15, на измеренную ДН сильно повлияли отражения сигналов от земли и деревьев.

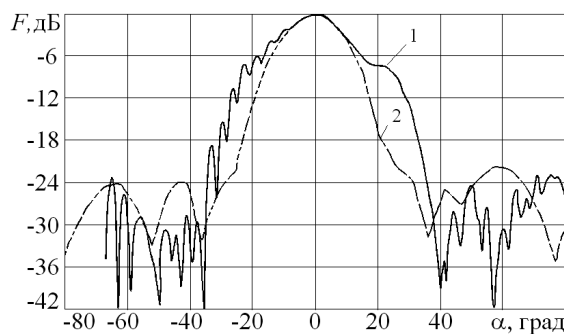


Рис. 15. Измеренная (1) и расчетная (2) ДН АР на частоте 9,5 ГГц

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальное соотношение КНД и уровня боковых лепестков антенной решетки на основе антенных элементов Вивальди обеспечивается при их расположении в узлах трехволновой сетки с шагом 1,2 длины волны верхней границы рабочего диапазона частот.

2. Исследуемая антенная решетка из семи антенных элементов Вивальди позволяет получить КНД 20 дБ и уровень боковых лепестков не выше минус 12 дБ по отношению к главному лепестку в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц.

#### Литература

1. Бененсон Л.С. Антенные решетки. – М.: Советское радио, 1966. – 367 с.
2. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны: учеб. для вузов. – М.: Радиотехника, 2008. – 384 с.
3. Кюн Р. Микроволновые антенны. – Л.: Судостроение, 1967. – 517 с.
4. Ultra-wideband low-cost phased array radars / С.Т. Rodenbeck, S.G. Kim, W.H. Tu et al. // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2005. – Vol. 53, № 12. – P. 3697–3703.
5. 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.
6. Гошин Г.Г. Установка для автоматизированных измерений характеристик антенн / Г.Г. Гошин., Д.В. Куулар, А.В. Фатеев // Изв. Том. гос. ун-та. – 2008. – Т. 51, № 9/2. – С. 164–165.

---

#### Куприц Владимир Юрьевич

М.н.с. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-38-89  
Эл. почта: rwplab@sibmail.com

#### Мещеряков Александр Алексеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-34-55  
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Kuprith V.U., Mescheryakov A.A.

#### The optimization of Vivaldi antenna arrangement in wide-band array

There was a study undertaken on the dependence of the characteristics of Vivaldi antenna arrays from the number and arrangement of the elements. The antenna array model with optimal arrangement Vivaldi antenna for reception of signals of linear polarisation has been made, its characteristics are given.

**Keywords:** antenna array, Vivaldi antenna, optimization.