

УДК 621.396.677

А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов

Широкополосная антенная решётка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика*

Рассматривается создание плоской широкополосной антенной решётки (АР), использующей излучающие структуры из искусственного неоднородного диэлектрика. Представлены результаты расчётов и экспериментального исследования АР диапазона 18–26 ГГц, использующей дополнительный фокусирующий слой из неоднородно-диэлектрических линз.

Ключевые слова: неоднородный диэлектрик, широкополосная антенная решётка.

Основная сложность в создании широкополосного излучателя АР – получение однонаправленной диаграммы направленности (ДН) при сохранении необходимого уровня согласования и параметров ДН во всей полосе частот. Известны различные типы широкополосных антенн, которые удовлетворяют одновременно части этих требований [1]. Дополнительной проблемой является создание широкополосной схемы деления мощности в диаграммообразующей схеме (ДОС). При большом числе излучателей АР необходимо большое число ступеней деления, что приводит к значительным потерям на рассогласование. Для уменьшения этих потерь необходимо сокращать число делителей в ДОС, а значит, и число излучателей.

Для решения данных проблем предлагается использовать в составе АР широкополосный излучатель проходного типа из искусственного неоднородного диэлектрика – цилиндрическую линзу Микаэляна [2]. В качестве широкополосного облучателя линзы используется широкополосный вибратор в печатном исполнении [3, 4], расположенный над металлическим экраном (рис. 1). Построенный таким образом излучатель АР может иметь произвольные размеры апертуры при сохранении плоского фазового фронта, что является преимуществом перед рупорными излучателями. Однако размер апертуры излучателя жёстко связан с его толщиной и диэлектрической проницаемостью в центре линзы. Кроме того, размер излучателя в составе решётки должен быть возможно меньше (при соответственно более высокой плотности размещения), чтобы уменьшить влияние спадающего к краям амплитудного распределения в линзе Микаэляна.

Линза Микаэляна

Неоднородный диэлектрик линзы Микаэляна можно реализовать разными способами [5–7]. В данной работе цилиндрическая линза набирается из плоских звездообразных слоёв диэлектрика, образованных N радиально расходящимися лепестками (рис. 2). В такой конструкции неоднородность диэлектрической проницаемости достигается путём изменения вдоль радиуса коэффициента заполнения материалом сектора, содержащего лепесток, в соответствии с законом для линзы Микаэляна:

$$n(r) = \frac{n_0}{\operatorname{ch}\left[\left(\frac{\pi r}{2L}\right)\right]}, \quad (1)$$

где $n(r)$ – зависимость показателя преломления вдоль радиуса, n_0 – показатель преломления в центре линзы, L – толщина линзы.

Если поставить дополнительное условие $n(r_0)=1$, где r_0 – радиус линзы, то выражение (2) запишется следующим образом:

$$n(r) = \frac{n_0}{\operatorname{ch}\left[(r/r_0)\operatorname{Arch} n_0\right]}. \quad (2)$$

* Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

Из (2) можно вычислить геометрию одного лепестка в полярных координатах как зависимость $\varphi(r)$, при этом $\varphi(0) = \pi/N$, а $\varphi(r_0) = 0$. Толщина линзы определяется из (1).



Рис. 1. Печатный широкополосный вибратор

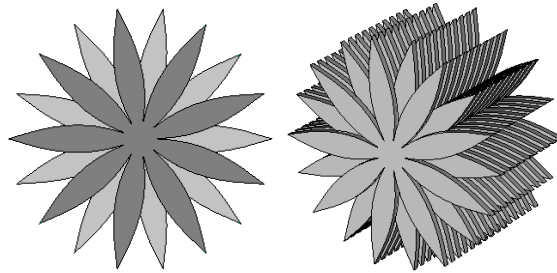


Рис. 2. Линза Микаэляна

Экспериментальное исследование макета АР

Для экспериментального исследования была изготовлена АР из 16 гексагонально расположенных элементов (рис. 3). Топология АР вытравлена с обеих сторон подложки из материала Rogers RT5880.

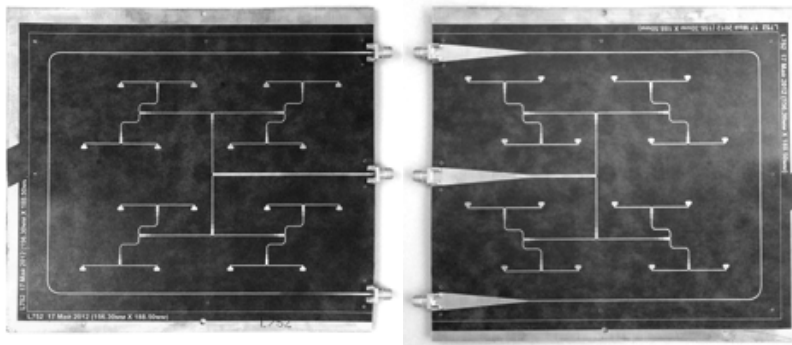


Рис. 3. Плата АР с вытравленной топологией. Верхняя и нижняя стороны

Для изготовления фокусирующего слоя из линз Микаэляна был выбран листовый материал толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью 2,9. Элементарный слой фокусирующего слоя образован шестнадцатью 9-лепестковыми элементами, соединяющимися в углах (рис. 4). При наборе полного слоя элементарные слои укладываются с чередованием направления лепестков (рис. 5). Между платой АР и фокусирующим слоем оставлен зазор 2 мм, необходимый для исключения влияния линз на распространение волны в двухпроводной линии передачи. Зазор между платой АР и экраном составляет 5 мм. Зазоры обеспечиваются слоями пенополистирола с $\epsilon = 1,05$.

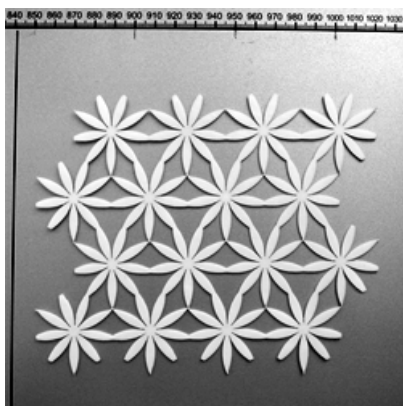


Рис. 4. Элемент фокусирующего слоя

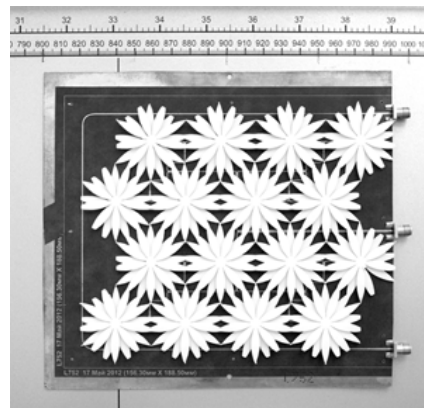


Рис. 5. Наложение элементарных слоёв на АР

Экспериментальный макет показан на рис. 6. Коэффициент отражения от входа исследуемой АР показан на рис. 7. Как видно из рисунка, коэффициент отражения в рабочей полосе частот не превышает -10 дБ.

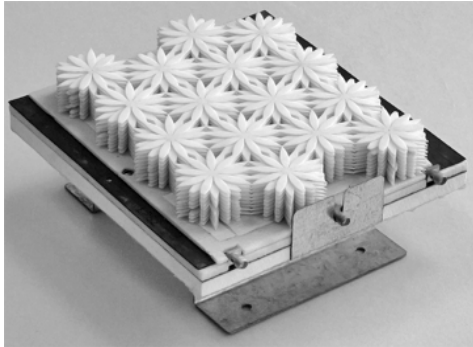


Рис. 6. Общий вид экспериментального макета

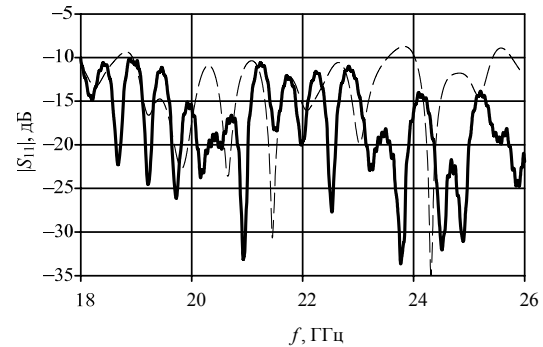


Рис. 7. Расчётный (пунктир) и экспериментальный коэффициенты отражения

Измерение характеристик направленности было проведено методом сканирования ближнего поля антенны [8]. Измеренные и расчётные ДН приведены на рис. 8 и 9. ДН приведены на граничных частотах рабочего диапазона для плоскости E ($\varphi = 90^\circ$). В данном сечении расстояние между элементами, а значит и уровень дифракционных лепестков, является максимальным, то есть данное сечение ДН является наиболее характерным. Из рисунков видно, что из-за сужения ДН излучателя дифракционный лепесток ослабляется до уровня, не превышающего уровень первого бокового лепестка, который за счёт некоторой неравномерности амплитудно-фазового распределения (АФР) равен -12 дБ. На рис. 10 приведены зависимости максимального УБЛ, наблюдаемого в четырёх характерных сечениях (угол плоскости сечения отсчитывается от плоскости H , которая параллельна горизонтальным рядам излучателей).

Частотные зависимости КНД и КУ показаны на рис. 11, где изображены графики КНД синфазной равномерно возбуждаемой апертуры, площадь которой равна площади антенны (D_{ca}), КНД, измеренного методом сканирования в ближней зоне $D_{изм}$ и КУ, измеренного при помощи эталонной антенны G .

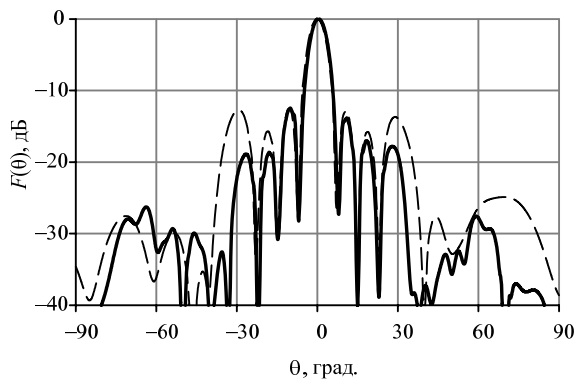


Рис. 8. ДН АР на 18 ГГц в плоскости E ($\varphi = 90^\circ$). Сплошная линия – эксперимент, пунктирная линия – расчёт

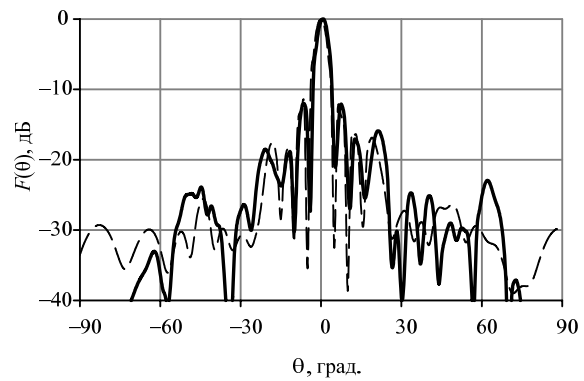


Рис. 9. ДН АР на 26 ГГц в плоскости E ($\varphi = 90^\circ$). Сплошная линия – эксперимент, пунктирная линия – расчёт

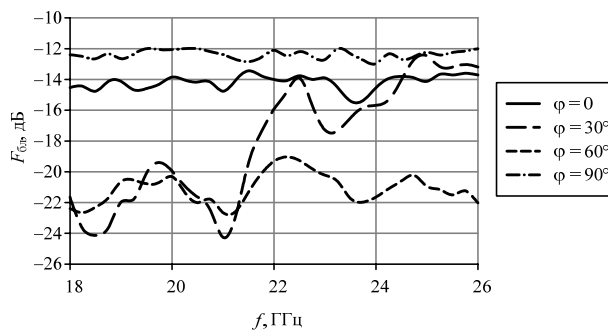


Рис. 10. УБЛ АР в различных сечениях ДН

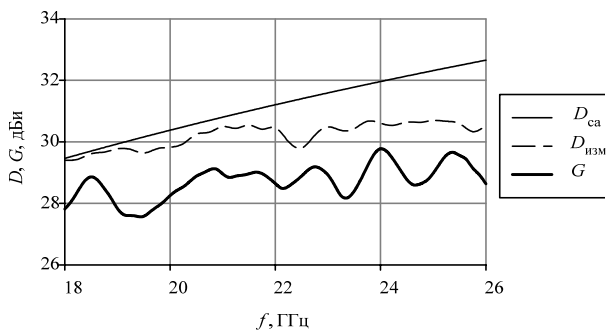


Рис. 11. КНД синфазной равномерно возбуждаемой апертуры (D_{ca}), измеренный КНД ($D_{изм}$) и КУ G

Заключение. В работе показана возможность создания плоской широкополосной антенной решётки, в которой применяется широкополосный излучатель проходного типа из искусственного неоднородного диэлектрика, использующий линзу Микаэляна в качестве фокусирующего элемента. Такой метод позволяет располагать излучатели АР на расстоянии, значительно превышающем длину волны, и при этом обеспечивать достаточное подавление дифракционных лепестков в широкой полосе частот.

Литература

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решёток: учеб. пособие для вузов / Под ред. Д.И. Воскресенского. – 4-е изд. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
2. Зелкин Е.Г. Линзовые антенны / Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. – М.: Советское радио, 1974. – 280 с.
3. Eldek A.A. Ultra wideband microstrip antenna for phased array applications // Radar Conference EuRAD 2007. – 10–12 Oct. 2007. – P. 319–322 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/4299668_Ultra_wideband_microstrip_antenna_for_phased_array_applications, свободный (дата обращения: 12.11.2012).
4. Eldek A.A. Wideband microstrip-fed printed bow-tie antenna for phased array systems / A.A. Eldek, A.Z. Elsherbeni, C.E. Smith // Microwave and optical technology letters. – 2004. – Vol. 43, № 2. – P. 123–126.
5. Rondineau S. A Sliced Spherical Luneburg Lens / S. Rondineau, M. Himdi, J. Sorieux // IEEE Antennas Wireless Propag. Letters. – 2003. – Vol. 2, Is. 1. – P. 163–166.
6. Bogaert I. Fast Full-Wave Validation of a Metamaterial Luneberg Lens / I. Bogaert, L. Meert, F. Olyslager. // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – Honolulu: IEEE Inc., 2007. – P. 3476–3479.
7. Brakora K.F. Design of 3-D Monolithic MMW Antennas Using Ceramic Stereolithography / K.F. Brakora, J. Halloran, K. Sarabandi // IEEE Trans on ant. and prop. – 2007. – Vol. 55, No. 3. – P. 790–797.
8. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин. – Л.: Наука, 1985.

Александрин Антон Михайлович

Аспирант каф. радиотехники СФУ, Красноярск

Тел.: 8-965-897-67-92

Эл. почта: aalexandrin@sfu-kras.ru

Саломатов Юрий Петрович

Зав. каф. радиотехники СФУ

Тел.: 8-902-965-31-72

Эл. почта: ysalomatov@sfu-kras.ru

Alexandrin A.M., Salomatov Yu.P.

Wideband array with artificial inhomogeneous dielectric structures

The article describes the construction of a flat wideband antenna array with the radiating artificial inhomogeneous dielectric structures. The calculation and experiment results for the 18–26 GHz antenna array with additional focusing layer are presented.

Keywords: inhomogeneous dielectric, wideband antenna array.