

в структуре антенны может использоваться композитный материал с отрицательным коэффициентом рефракции (так называемый метаматериал),

что позволит добиться практически стопроцентной эффективности излучения антенны в некотором диапазоне частот [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walter C. H. Traveling wave antennas. New York: McGraw-Hill, 1965. 429 p.
2. Liu J., Jackson D. R., Long Y. Modal analysis of dielectric-filled rectangular waveguide with transverse slots // IEEE Trans. on antennas and propag. 2011. Vol. AP-59, № 9. P. 3194–3203.
3. Hyneman R. F. Closely-spaced transverse slots in rectangular waveguide // IRE Trans. on antennas propag. 1959. Vol. 7, Oct. P. 335–342.

4. Felsen L. B., Marcuvitz N. Radiation and scattering of waves. Englewood Cliffs: Prentice Hall, New Jersey, 1973. 382 p.
5. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и связь, 1986. 144 с.
6. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.
7. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. М.: Сов. радио, 1967. 216 с.

R. R. Abdullin, S. N. Shabunin

Ural federal university n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin

Analysis of leaky-wave antenna based on partially-filled rectangular waveguide

A leaky-wave antenna based on the partially-filled rectangular waveguide with transverse slots is investigated. Using tensor Green's functions for antenna radiation analysis is suggested. A transcendental equation for a complex wavenumber obtained by matching magnetic fields inside and outside the waveguide is presented. Plots of velocity factor dependencies on waveguide filling parameters are shown. An influence of dielectric layer position on the antenna performances is investigated. Radiation pattern is estimated.

Leaky-wave antenna, rectangular waveguide, layered structure, wavenumber, velocity factor, tensor Green's function method, radiation pattern

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2014 г.

УДК 621.396.677

С. В. Балландович

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Проектирование двухчастотных печатных отражательных антенных решеток с помощью модифицированной ячейки Флоке

Описана методика проектирования двухчастотных печатных отражательных антенных решеток с улучшенными характеристиками направленности. Приведены расчетные данные для антенн, спроектированных с использованием стандартной и предложенной методик.

Печатные отражательные антенные решетки, двухчастотные антенны, коэффициент направленного действия

Бурное развитие современных телекоммуникационных систем и постоянно возрастающие требования к характеристикам антенн для них делают актуальным проектирование широкополосных и многочастотных печатных отражательных антенных решеток (ПОАР) [1]. Ряд технологических и эксплуатационных особенностей ПОАР

позволяют считать их привлекательной альтернативой классическим зеркальным антеннам. Между тем из литературных источников [1] следует, что типичные остронаправленные ПОАР сохраняют работоспособность в крайне ограниченном частотном интервале, составляющем около 10 % от центральной частоты.

Ряд публикаций по двухчастотным ПОАР содержат описание антенн, предназначенных для работы с конкретным видом поляризации в каждом из частотных диапазонов [2]–[5], что сужает область их применения. С этой точки зрения наиболее перспективными представляются двухчастотные антенны с совмещенным раскрывом (рис. 1). В отличие от стандартного раскрыва одночастотной ПОАР (рис. 1, а) совмещенный раскрыв (рис. 1, б) состоит из чередующихся печатных элементов (ПЭ) f_1 и f_2 , предназначенных для работы в разных частотных диапазонах.

К ключевым моментам проектирования ПОАР относится поиск зависимости фазы рассеянного поля от размера ПЭ. Как правило, характеристики ПЭ рассчитываются в приближении локальной периодичности (ячейки Флоке) [1], границы которой показаны на рис. 1 штриховыми линиями.

Особенностью совмещенных раскрывов является наличие двух видов взаимного влияния ПЭ: первый определяется взаимодействием ПЭ одного частотного диапазона между собой, второй – взаимодействием ПЭ разных частотных диапазонов. Очевидно, что стандартный раскрыв характеризуется только взаимным влиянием первого вида, которое принято учитывать с помощью ячейки Флоке. Учет взаимного влияния второго вида требует специального рассмотрения. В частности, в работах [6], [7] взаимодействие ПЭ двухчастотной ПОАР сводится к минимуму оптимизацией относительной диэлектрической проницаемости и высоты подложки. Расположение ПЭ, характеризуемого размером L , в ячейке Флоке для такого случая показано на рис. 2, а. Такой способ регулировки взаимного влияния существенно ограничивает разработчика в выборе применяемых СВЧ-диэлектриков и может привести к значительному росту стоимости антенны.

Для преодоления указанного недостатка предлагается использовать при проектировании двухчастотных ПОАР модифицированную ячейку Флоке (рис. 2, б). Ее отличие от стандартной за-

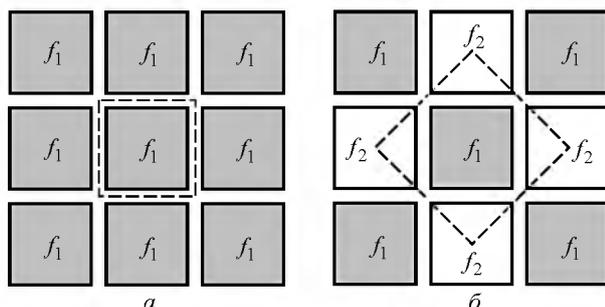


Рис. 1

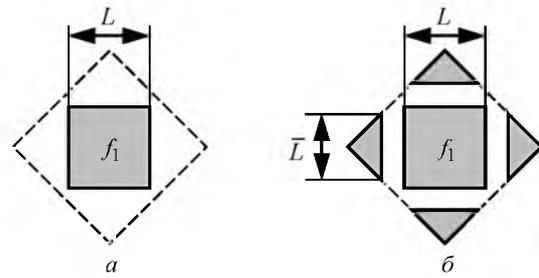


Рис. 2

ключается в наличии пассивных элементов, размер \bar{L} которых выбирается как средний по раскрыву для ПЭ другого частотного диапазона.

Для проверки эффективности предложенной методики спроектированы две ПОАР с раскрывом 600×600 мм, предназначенные для работы в диапазоне 18...26 ГГц. При синтезе первой использовалась модифицированная ячейка Флоке, при синтезе второй – стандартная. Рассматривалось облучение ПОАР рупором, фазовый центр которого располагался на расстоянии 600 мм от центра раскрыва. Центральные частоты рабочих диапазонов выбраны равными 20 и 24 ГГц. Одиночный элемент раскрыва представлял собой вложенные друг в друга рамки (рис. 3) с геометрическими параметрами $G = W_1 = W_0 = 0.5$ мм, диэлектрической подложкой из пенополиэтилена толщиной 2 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon' = 1.05$. Габариты ячейки $a \times a = 9 \times 9$ мм.

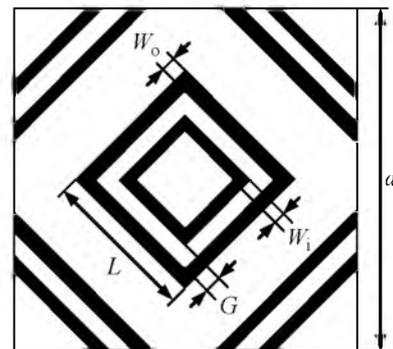


Рис. 3

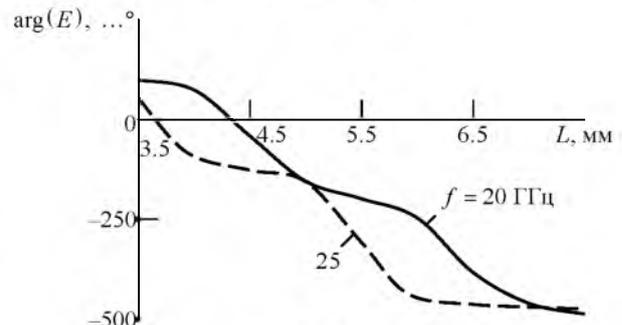


Рис. 4

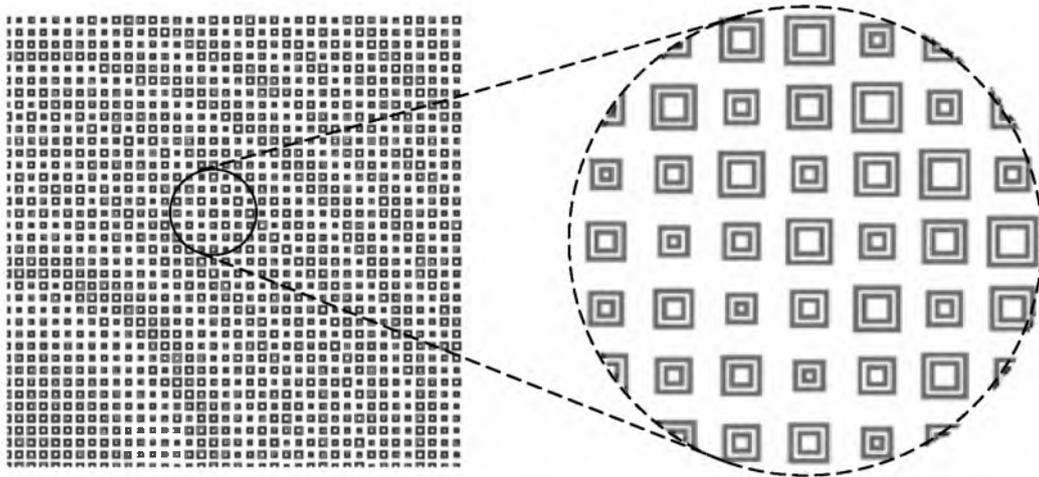


Рис. 5

Предварительные расчеты ПОАР с такой геометрией показали, что в верхней полосе частот максимум коэффициента направленного действия (КНД) соответствовал частоте несколько ниже 24 ГГц, поэтому при проектировании окончательного варианта ПОАР синтез геометрии в верхнем диапазоне осуществлялся на частоте 25 ГГц. Расчетные зависимости фазы рассеянного поля $\arg(E)$ от размеров ПЭ L , полученные при $\bar{L} = 4$ мм на частоте 20 ГГц и при $\bar{L} = 5$ мм на частоте 25 ГГц, показаны на рис. 4. На рис. 5 изображен фрагмент раскрыва однослойной ПОАР, спроектированной с помощью зависимостей, представленных на рис. 4.

Расчетные зависимости КНД от частоты для ПОАР показаны на рис. 6. Кривая 1 соответствует модифицированной ячейке Флоке (рис. 2, б), кривая 2 – стандартной ячейке (рис. 2, а). Моделирование производилось с помощью метода конечных элементов (FEM). Для сравнения здесь же приведена аналогичная зависимость (кривая 3) для трехслойной ПОАР, спроектированной с использованием модифицированной ячейки Флоке. Из приведенных зависимостей следует, что ПОАР, спроектированная на базе стандартной ячейки (кривая 2), уступает в эффективности ПОАР, спроектированной на базе модифицированной ячейки Флоке (кривая 1). Так, в нижнем частотном диапазоне КНД антенны на основе модифицированной ячейки выше на 1.2 дБ, а в верхнем частотном диапазоне – на 0.2 дБ. Анализируя зависимости КНД от частоты, можно сделать вывод, что однослойная структура в данном случае обладает

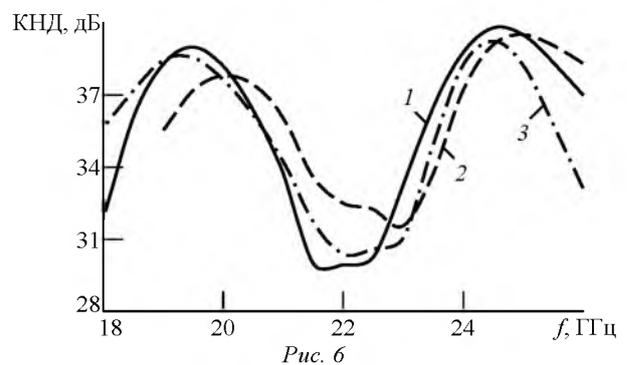


Рис. 6

некоторым преимуществом перед трехслойной (кривая 3). Расчеты показали, что коэффициент использования поверхности (КИП) однослойной ПОАР на базе модифицированной ячейки Флоке на частоте 19.5 ГГц составляет 41.7 %, а на частоте 24.5 ГГц – 31.6 %.

Опыт проектирования двухчастотных ПОАР с применением данной методики показал, что увеличение КНД составляет 0.5...1 дБ. Поскольку КИП двухчастотных ПОАР обычно ниже, чем одночастотных, такое улучшение характеристик имеет ценность.

В настоящей статье предложена методика проектирования двухчастотных ПОАР с помощью модифицированной ячейки Флоке. В отличие от известных работ [6], [7] в состав ячейки добавлены элементы для учета влияния ПЭ другого частотного диапазона. Расчетные данные показывают, что предложенная модификация ячейки Флоке позволяет проектировать двухчастотные ПОАР с улучшенными характеристиками направленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang J., Encinar J. A. Reflectarray antennas. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 320 p.
2. Encinar J. A., Barba M. Design Manufacture and test of ka-band reflectarray antenna for trasmitting and receiving in orthogonal polarization // Proc. on 14th Int. Symp. on antenna technology and applied electromagnetics (ANTEM) & the American electromagnetics conf., Ottawa, 5–8 July 2010. Piscataway: IEEE, 2010. P. 1–4.
3. Design, manufacturing, and testing of a 20/30-GHz dual-band circularly polarized reflectarray antenna / Th. Smith, U. Gothelf, O. S. Kim, O. Breinbjerg // IEEE ant. and wireless propagation letters. 2013. Vol. 12. P. 1480–1483.
4. Design and measurement of a circularly polarized ka-band reflectarray antenna / Ang Yu, Fan Yang, A. Z. Elsherbini, J. Huang // 3rd Europ. conf. on ant. and propagation (EuCAP 2009), Berlin, 23–27 March 2009. Piscataway: IEEE, 2009. P. 2769–2773.
5. Отражательная антенная решетка для сетей дуплексной спутниковой связи технологии VSAT / С. В. Поленга, Ю. П. Саломатов, Е. А. Литинская, Р. М. Крылов // Усп. совр. радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 039–042.
6. Design of broadband, single layer dual-band large reflectarray using multi open loop elements / M. R. Chaharmir, J. Shaker, N. Gagnon, D. Lee // IEEE Trans. on ant. and propagation. 2010. Vol. AP-58, № 9. P. 2875–2883.
7. Chaharmir R., Shaker J., Cuhaci M. Development of dual-band circularly polarized reflectarray // IEE Proc. microwaves, ant. and propagation. 2006. Vol. 153, iss. 1. P. 49–54.

S. V. Ballandovich

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Designing of a dual-band printed reflectarray based on the modified Floque cell

Method of designing of a dual-band printed reflectarray with improved characteristics is described. Calculated data for printed reflectarrays based on the modified and common Floque cell are presented.

Printed reflectarrays, dual-band antennas, directivity

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2015 г.