

Щелевая антенная решетка Ку-диапазона на базе резонатора Фабри-Перо

М.И. Сугак¹, А.Г. Журавлев²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²НПП «Новые Технологии Телекоммуникаций»

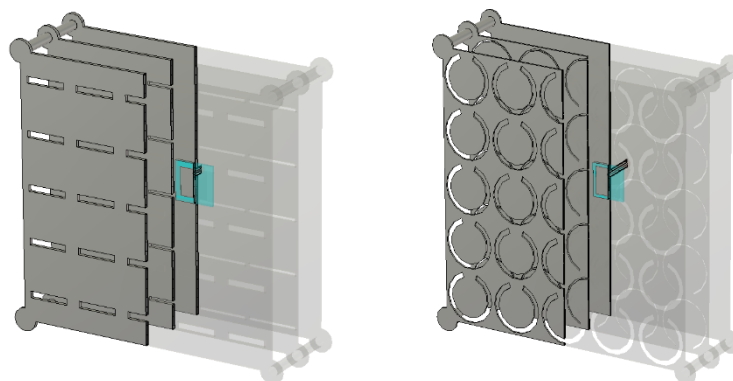
Аннотация: в работе представлены результаты проектирования и исследования антенных решеток (АР), построенных на базе резонатора Фабри-Перо с применением щелевых излучающих элементов. В результате проектирования в АР, состоящей из 5 x 5 щелевых излучателей дуговой формы, достигнут коэффициент использования поверхности (КИП) выше -3 дБ в полосе частот 4 %, уровень боковых лепестков (УБЛ) около -13 дБ.

Ключевые слова: резонатор Фабри-Перо, антенные решетки, низкопрофильные антенны, щелевые антенные решетки

1. Введение

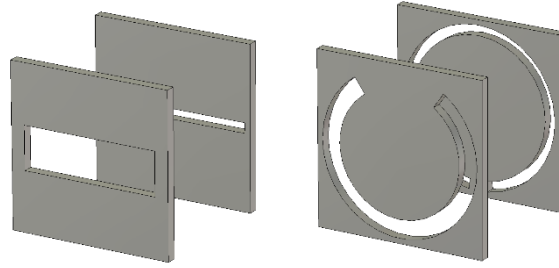
Интерес к антенным решеткам СВЧ диапазона, выполненным на основе резонаторов Фабри-Перо (РФП), обусловлен возможностью существенного упрощения системы распределения мощности между излучающими элементами. Это выгодно отличает их от волноводно-щелевых, печатных и других аналогичных АР с распределительной системой питания на волноводах или микрополосковых линиях, что позволяет снизить стоимость изготовления и улучшить электрические характеристики антенн, особенно в перспективных системах связи миллиметрового диапазона.

Резонатор Фабри-Перо в радиочастотном диапазоне в данном случае образован минимум двумя параллельными проводящими пластинами, одна из которых является сплошным рефлектором, а остальные содержат щелевые элементы, которые формируют поле излучения (см. рис. 1 а, б).



а

б



В

Рисунок 1. Щелевые АР на основе резонатора Фабри-Перо составленные из: а – линейных щелей (ЛЩ); б – дуговых щелей (ДЩ); в – геометрия одиночных элементов.

Минимальное расстояние, необходимое для существования резонанса, между стенками резонатора составляет половину длины волны, это же условие соответствует минимуму добротности такого резонатора [1]. Возбуждение осуществляется в центре задней (сплошной) пластины открытым концом волновода или слабонаправленным элементом другого типа. С целью расширения полосы рабочих частот полупрозрачную стенку РФП делают многослойной, что приводит к появлению положительного участка наклона фазы коэффициента отражения [2, 3] и выполнению фазового баланса в большей полосе частот. Наилучшие результаты в характеристиках антенных решеток на РФП получены с использованием микрополосковых отражателей [2 – 6], применение щелевых или апертурных элементов изучено гораздо хуже [7], вместе с тем, их применение по ряду соображений представляется более целесообразным.

2. Моделирование распределения тока на стенках резонатора

Необходимо выявить условие обеспечения возможности синфазности поля в выходной плоскости линзы (полупрозрачной стенке резонатора), где будут затем установлены излучающие щели. Электрические размеры резонатора составляют $3,4\lambda_0 \times 3,4\lambda_0$ ($\lambda_0 = 2d$, d – расстояние между стенками резонатора). Возбуждение выполнялось в центре рефлектора одиночным печатным излучателем.

О характере исходного амплитудно-фазового распределения в АР на основе РФП, не возмущенного щелями, дают представление результаты электродинамического моделирования, приведенные на рис. 2.

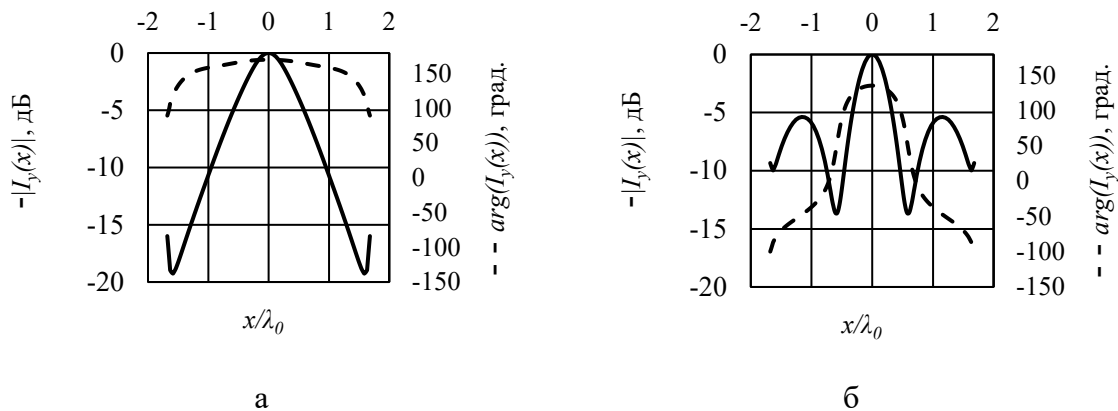


Рисунок 2. Распределение y -ой компоненты поверхностного тока по оси x на поверхности листа: а – $\lambda = 2d$; б – $\lambda = 1,9d$.

По представленным распределениям можно сделать вывод, что при электрическом

расстоянии между листами в половину длины волны фазовая ошибка на краях резонатора достигает 80 градусов (см. рис. 2 а), а амплитудное распределение носит спадающий к краям раскрыва характер до уровня минус 20 дБ. При увеличении электрического расстояния между стенками РФП фазовая ошибка на краях резонатора увеличивается, для случая, приведенного на рис. 2 б, она уже составляет около 230 градусов. Для сохранения синфазности раскрыва возможна оптимизация группы отражательных ячеек [8]. В данной работе все отражательные ячейки имеют одинаковые размеры.

3. Моделирование одиночной ячейки полупрозрачной линзы

В качестве элемента полупрозрачной линзы исследователи обычно используют печатные элементы [2 – 6], в данной работе для улучшения стоимостно-эксплуатационных характеристик АР используются щелевые элементы, которые могут быть выполнены методом лазерной резки. Разработка полупрозрачной линзы выполнялась методом моделирования одиночного отражательного элемента в ячейке Флоке. Форма исследуемых одиночных щелевых элементов представлена на рис. 1 в.

Изменением геометрических размеров одиночной ячейки ($w1$ – длина узкой линейной щели, $w2$ – широкой, $l1$ – длина узкой дуговой щели, $l2$ – широкой), а также расстоянием между слоями, можно управлять поведением фазы коэффициента отражения (см. рис. 3).

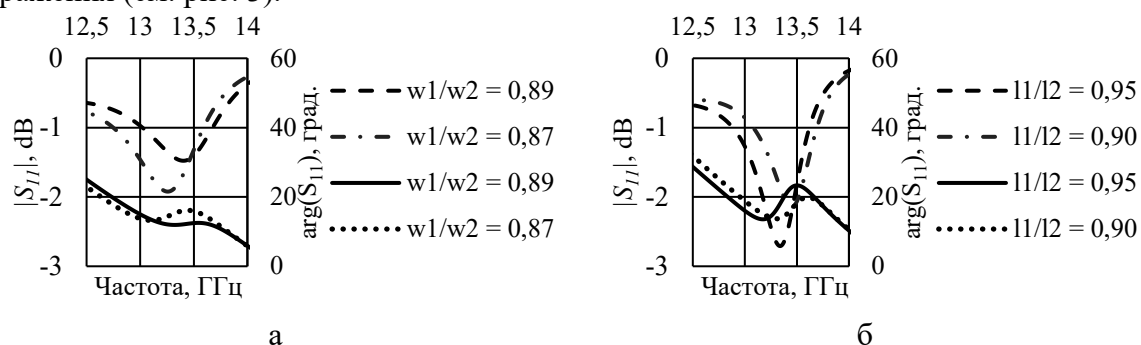


Рисунок 3. Модуль и фаза коэффициента отражения от одиночной ячейки: а – ЛЩ; б – ДЩ.

Следуя методике, представленной в [7], при варьировании размеров щелей в каждом слое, а также расстоянием между слоями, был найден участок с положительным наклоном фазы коэффициента отражения, который является перспективным с точки зрения построения АР.

В качестве возбуждающего элемента в исследуемых АР использовалась печатная антенна, расстояние между прозрачной и полупрозрачной линзой составляла $0,53\lambda_{cp}$ ($\lambda_{cp} = 22,56$ мм), а между слоями полупрозрачной линзы $0,58\lambda_{cp}$. Размеры всей системы $(3,55 \times 3,55 \times 1,33)\lambda_{cp}$. Шаг между отражательными элементами $0,70\lambda_{cp}$.

По результатам численной оптимизации с варьированием размеров элементов в каждом слое, расстоянием между слоями, а также геометрии возбуждающего элемента, были получены электродинамические характеристики АР, представленные на рис. 4 – 7.

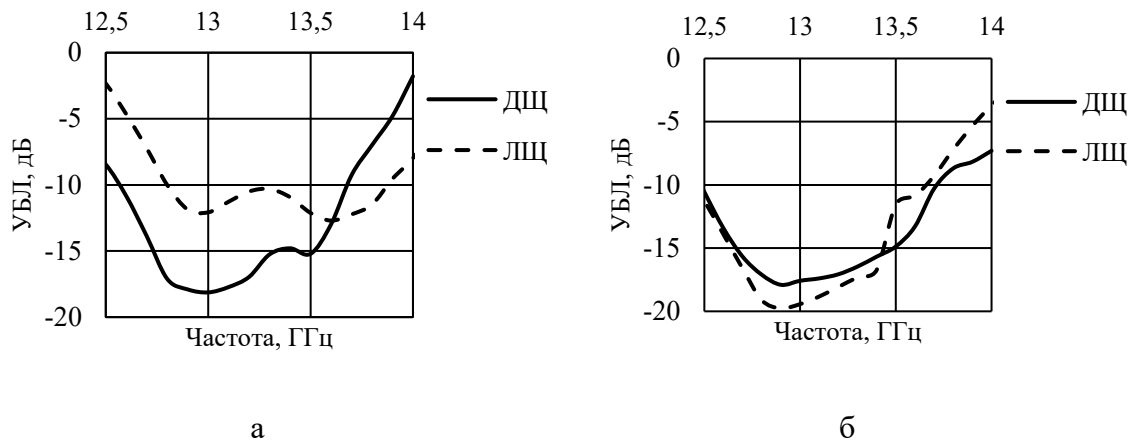


Рисунок 4. Частотная зависимость УБЛ: а – в Е-плоскости; б – в Н-плоскости.

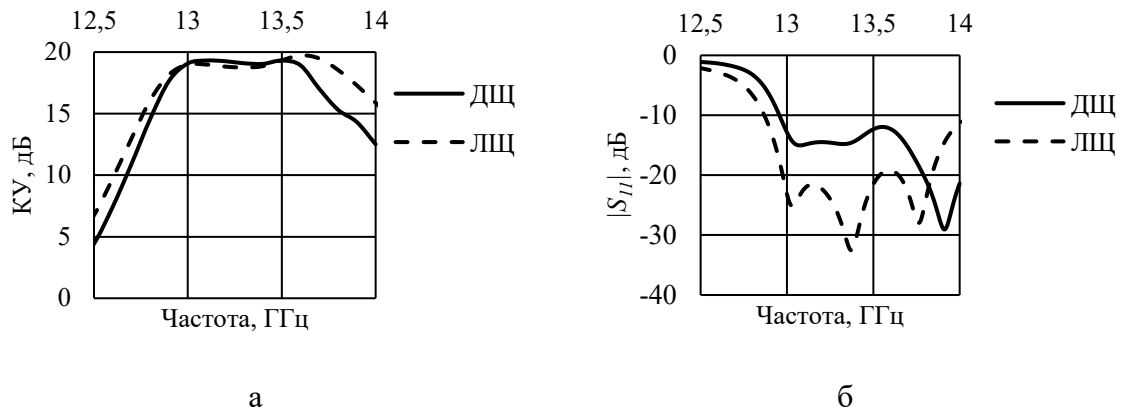


Рисунок 5. Частотная зависимость: а – КУ; б – модуля коэффициента отражения.

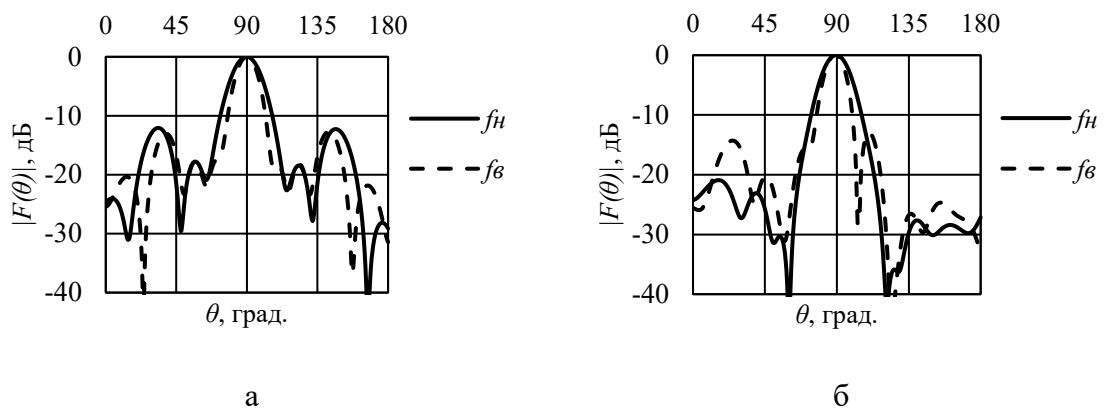


Рисунок 6. Диаграмма направленности в Е-плоскости: а – ЛЩ; б – ДЩ.

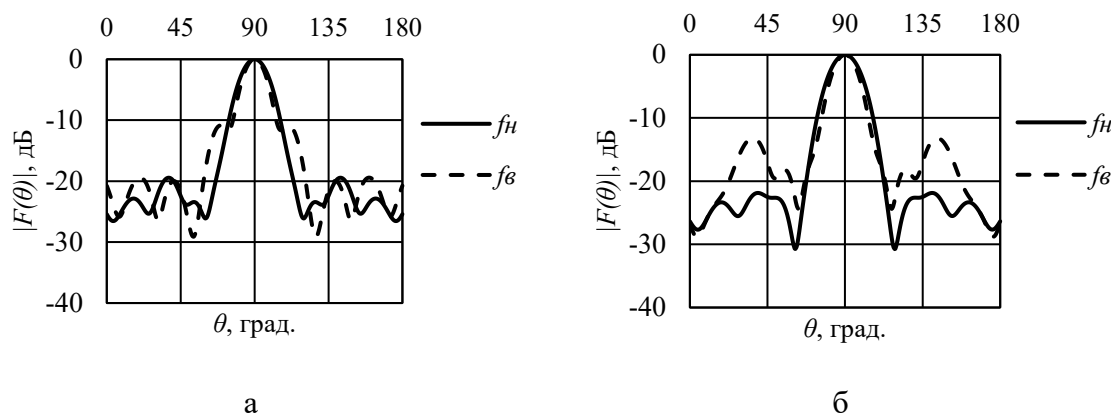


Рисунок 7. Диаграмма направленности в H-плоскости: а – ЛЩ; б – ДЩ.

По представленным кривым можно сделать вывод, что АР, составленная из ДЩ обладает меньшим УБЛ в рабочей полосе частот, однако уступает по уровню согласования АР, составленной из ЛЩ, КИП обоих АР соизмерим.

4. Заключение

Щелевые АР, построенные на базе РФП, имеют электродинамические характеристики соизмеримые с их известными печатными аналогами. Показана возможность построения таких решеток с КУ около 20 дБ, для достижения более высоких значений КУ требуется объединение таких АР в секционированные антенные системы, подобные тем, которые описаны в работе [5]. Возможность увеличения КУ таких АР при увеличении размера апертуры решетки с отдельной оптимизацией группы отражательных ячеек требует исследования.

Список литературы

1. Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, 6-Volume Set/ ed by K. Chang – Wiley-Interscience; 1st edition. March 14, 2005, 5832 pages.
2. Y. Ge, K. P. Esselle, and T. S. Bird, "Designing a partially reflective surface with increasing reflection phase for wideband EBG resonator antennas," in IEEE Int. Antennas Propag. Symp. Dig., North Charleston, SC, Jun. 1–5, 2009.
3. Alexandrin, A. M. Ku-band Antenna Array Element Based on Fabry-Perot Cavity [Текст] / A. M. Alexandrin, S. V. Polenga, A. V. Stankovsky, A. D. Nemshon, Y. A. Litinskaya, A. D. Hudonogova, Yu. P. Salomatov // Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2016. — 2016.
4. Konstantinidis K., Feresidis A. P., Hall P. S. Multilayer Partially Reflective Surfaces for Broadband Fabry-Perot Cavity Antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 62, № 7. P. 3474–3481. doi: 10.1109/TAP.2014.2320755
5. Y. Ge, K. P. Esselle and T. S. Bird, "The Use of Simple Thin Partially Reflective Surfaces With Positive Reflection Phase Gradients to Design Wideband, Low-Profile EBG Resonator Antennas," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012 Vol. 60, № 2. P. 743-750.
6. Литинская Е.А., Поленга С.В., Саломатов Ю.П. Антенная решетка на основе резонаторов Фабри–Перо с механоэлектрическим сканированием. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021;24(5):36-49. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-5-36-49>
7. A Metallic Fabry-Perot Directive Antenna / Guerin N., Enoch S., Tayeb G., Sabouroux P., Vincent P, and Legay H. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2006. Vol. 54, № 1. P. 220 – 224. DOI:10.1109/TAP.2005.861578
8. Hui-Fen Huang, Qi-Sheng Fan. Broadband and High-Aperture Efficiency Fabry-Perot Antenna with Low RCS Based on Nonuniform Metamaterial Superstrate // Progress In Electromagnetics Research. 2021. Vol. № 101, P. 59 – 68.