



**II Всероссийская объединённая научная конференция  
"Проблемы СВЧ-Электроники" МИЭМ НИУ ВШЭ –  
"Инновационные решения" Keysight Technologies**

# **СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ISBN: 978-5-903650-31-6**

Москва, 2015 г.

# ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА С ЭЛЕКТРОННОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПОЛОСЫ ЗАПИРАНИЯ

Кухаренко А.С.<sup>1</sup>, Елizarов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал открытого акционерного общества «Объединенная ракетно-космическая корпорация»  
«Научно-исследовательский институт космического приборостроения» Россия, Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Россия, Москва

В настоящее время в СВЧ-технике все большее значение приобретают частотно-селективные поверхности, выполненные на основе метаматериалов. Эти структуры позволяют решать такие задачи, как развязка элементов антенных решеток, подавление многолучевости в навигационных системах, уменьшение влияния края экрана на диаграммы направленности антенных элементов и т.д. Применение в конструкциях СВЧ-устройств поверхностей на основе грибовидных метаматериалов позволяет существенно улучшить их свойства и рабочие характеристики. Конструктивно грибовидные метаматериалы являются периодическими микрополосковыми структурами и их свойства существенно зависят от параметров подложки и точности изготовления проводящего рисунка. А поскольку эти структуры обладают узкой полосой запырания, это вынуждает использовать дорогие материалы и высокоточное производство для их изготовления. В данной работе предложен способ смещения полосы запырания частотно-селективной структуры, выполненной на основе грибовидного метаматериала, заключающийся в том, что между двумя связанными шляпками грибов устанавливается варикап, один вывод которого заземлен по постоянному току через металлизированное переходное отверстие структуры метаматериала, а другой подключен к управляемому источнику постоянного напряжения. При этом соседние шляпки грибов связаны между собой не менее чем двумя емкостными зазорами, параллельно одному из которых и установлен варикап, эквивалентная емкость которого определяется величиной постоянного напряжения управляемого источника. Разработана конструкция полосно-запырающей частотно-селективной поверхности на основе метаматериала с электронной перестройкой полосы запырания, а также представлены результаты численного моделирования ограниченного участка метаматериала с установленными сосредоточенными емкостями, демонстрирующие смещение полосы запырания структуры одновременно с изменением емкости сосредоточенных элементов. Получена зависимость резонансной частоты структуры от величины сосредоточенной индуктивности. Приведены зависимости диэлектрических параметров конструкции от частоты, подтверждающие, что предложенная структура является метаматериалом.

**Ключевые слова:** метаматериал, частотно-селективная поверхность, электронная перестройка частоты, полосно-запырающая структура.

В настоящее время при конструировании различных устройств СВЧ все больше внимания уделяется частотно-селективным поверхностям, выполненным на основе метаматериалов [1]. Особенно широкое применение они получили в СВЧ-электронике и антенной технике. В частности, эти структуры позволяют обеспечить развязку элементов антенных решеток, подавление многолучевости в навигационных системах, уменьшение влияния края экрана на диаграммы направленности антенных элементов и т.д. [2-5]. Применение в конструкциях СВЧ-устройств поверхностей на основе метаматериалов грибовидного типа, позволяет существенно улучшить их свойства и рабочие характеристики [3-7].

Конструктивно грибовидные метаматериалы представляют собой экранированную с одной стороны однослойную диэлектрическую плату с периодически расположенными рядами сквозных отверстий, в каждом из которых закреплены идентичные металлические элементы в виде распределенных колебательных контуров, связанных емкостными зазорами, и имеющих геометрические размеры, много меньшие рабочей длины волны (рис. 1) [8, 9]. Распределенные колебательные контуры могут быть представлены эквивалентной схемой (рис.1б), содержащей индуктивности, образованные цилиндрическими металлическими ножками, соединенными с экраном, и емкости, сформированные между соседними контурами. Такая конструкция представляет собой линию передачи с отрицательной дисперсией, обладающую отрицательной фазовой скоростью и положительной групповой скоростью. Каждый из идентичных колебательных контуров при изменении геометрических размеров может иметь резонансную частоту от 0,1 до 100 ГГц.

Резонансные характеристики такой структуры существенно зависят от параметров подложки и точности изготовления проводящего рисунка. А поскольку эти конструкции обладают узкой полосой запырания, это вынуждает использовать дорогие материалы подложек и высокоточное производство для нанесения проводящего рисунка.

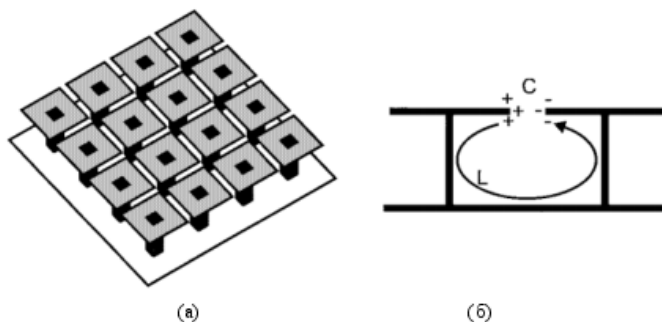


Рис. 1. Структура грибовидного метаматериала (а) и её эквивалентная схема (б)

Для обеспечения возможности перестройки полосы заграждения топологического участка частотно-селективной поверхности на основе грибовидного метаматериала, предложен способ, заключающийся в том, что между двумя связанными резонансными контурами устанавливаются в варикапы, один вывод которых заземлен по постоянному току через металлизированное переходное отверстие структуры метаматериала, а другой подключен к управляемому источнику постоянного напряжения.

Конструкция участка такой частотно-селективной поверхности представлена на рис. 2. В данном случае, с целью увеличения индуктивности и снижения резонансной частоты, верхние металлические элементы метаматериала (2) выполнены в виде архимедовых спиралей. Между двумя соседними резонансными контурами параллельно краям спиралей размещен проводник (3), не имеющий омического контакта с ними и длина которого равна их высоте. Таким образом, соседние контуры оказываются связанными двумя емкостными зазорами, параллельно одному из которых и устанавливается варикап (4). При этом дополнительно введенный проводник служит также и площадкой, к которой подводится напряжение для управления параметрами варикапа.

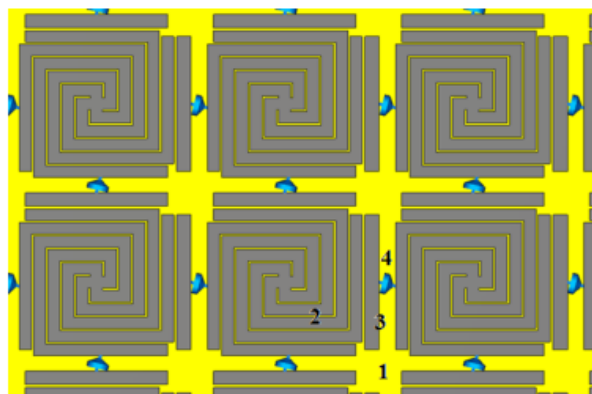
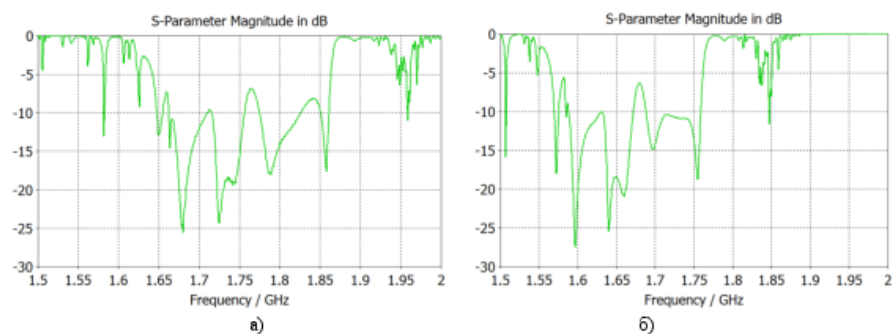


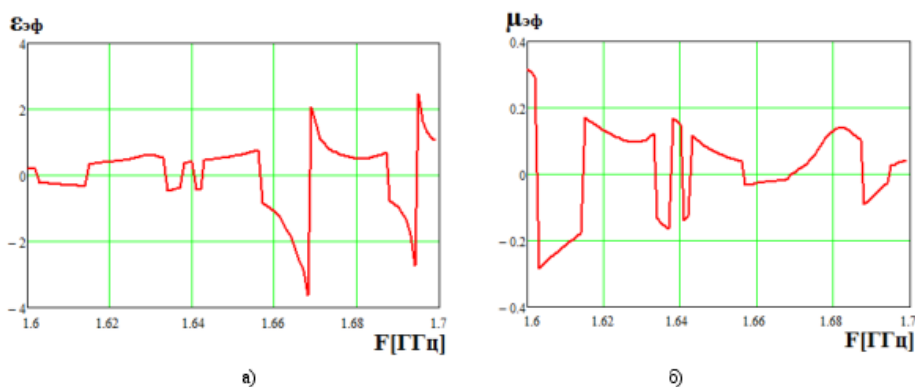
Рис. 2. Конструкция частотно-селективной поверхности на основе грибовидного метаматериала с перестраиваемой полосой заграждения.

На рис. 3 приведены результаты расчетов комплексного коэффициента передачи  $S_{21}$  от частоты для участка частотно-селективной высокоимпедансной поверхности при установке параллельно емкостным зазорам сосредоточенных емкостей с величинами 2,0 пФ (рис. 2а) и 6,0 пФ (рис. 2б). Сама структура метаматериала при этом выполнена на диэлектрической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 4,8 и габаритными размерами 210\*210\*1 мм. Элементы в форме спиралей имеют размеры 15\*15 мм, а расстояние между ними составляет 3 мм. Возбуждение конструкции осуществлялось при помощи емкостного зазора, образованного двумя параллельными микрополосковыми линиями, расположенными по краям диэлектрической платы. Такая частотно-селективная поверхность имеет полосу заграждения 100 МГц по уровню минус 10 дБ в диапазоне частот L1. Из графиков видно, что при увеличении значения емкости с 2 до 6 пФ полоса заграждения структуры смещается на 84 МГц вниз по частоте и в такой конфигурации полностью перекрывает частотный диапазон L1 спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS и GALILEO.



**Рис. 3.** Комплексный коэффициент передачи участка частотно-селективной поверхности с установленными сосредоточенными емкостями 2 пФ (а) и 6 пФ (б)

На рисунке 4 приведены результаты расчетов зависимостей эффективных диэлектрической (рис. 3(а)) и магнитной (рис. 3(б)) проницаемостей от частоты для рассматриваемого участка частотно-селективной высокоимпедансной поверхности при установке параллельно емкостным зазорам сосредоточенных емкостей величиной 6,0 пФ. При расчете использовалась методика вычисления эффективных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей, описанная в [10].



**Рис. 4.** Эффективная диэлектрическая (а) и магнитная (б) проницаемости участка частотно-селективной поверхности.

Из графиков видно, что в полосе зашоривания диэлектрическая и магнитная проницаемости принимают отрицательные значения, что является безусловным свойством метаматериалов.

Представленная частотно-селективная высокоимпедансная поверхность может быть использована для обеспечения пространственной развязки элементов антенных решеток, создания специализированных экранов прецизионных антенн спутниковых систем навигации, а также при конструировании антенн Фабри-Перо.

Таким образом, в работе показана возможность оперативной подстройки полосы заграждения ограниченного участка частотно-селективной поверхности при помощи варикапов. Предложена конструкция такой поверхности, в основу которой положена структура грибовидного метаматериала, обеспечивающая по отношению к электромагнитной волне, отрицательные значения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемостей, а также поверхностного импеданса, перестраиваемого по частоте, и существенно превосходящего его волновое сопротивление свободного пространства. Приведены результаты численного моделирования параметров полученной структуры, демонстрирующие смещение полосы заграждения при изменении значений эквивалентной сосредоточенной емкости.

#### Литература

1. *Mink B.* Frequency selective surfaces: theory and design – New York: A John Wiley & Sons Inc., 2000. – 410 p.
2. *Кухаренко А.С., Елизаров А.А.* Анализ физических особенностей метаматериалов и частотно-селективных СВЧ устройств на их основе // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т.9. №5. С.36-41.
3. *Елизаров А.А., Кухаренко А.С.* Широкополосные частотно-селективные СВЧ устройства на основе планарных модифицированных грибовидных метаматериалов // В кн.: 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрымМиКо-2015). Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.: Материалы конференции в 2-х т. Т.1. Севастополь: КНТЦ им. А.С. Попова, 2015. С.586-587.
4. *Бойко С.Н., Елизаров А.А., Закирова Э.А., Кухаренко А.С.* Исследование малогабаритного развязывающего СВЧ-фильтра на метаматериале // В кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014. Материалы международной научно-технической конференции, г. Саратов, 25-26 сентября 2014. Т.1. Саратов: ООО "Буква", 2014. С.218-225.
5. *J. Volakis.* Antenna engineering handbook. London McGraw-Hill, 2007, 1753 p.
6. *Engheta N., Ziolkowsky R.W.* Metamaterials – physics and engineering exploration. - Danvers: John Wiley & Sons Inc., 2006. – 414 p.
7. *Metamaterials Handbook: Vol. I. Phenomena and Theory of Metamaterials. – 926 p.; Vol. II. Applications of Metamaterials. – 724 p. / Ed. by F. Capolino, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.*
8. *Caloz Ch, Itoh T.* Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications (the engineering approach) – New Jersey: A John Wiley & Sons Inc., 2006. – 352 p.
9. *Severipiper D., Zhang L., Broas R. J., Alexopolous N.G., and Yablonovich E.* High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Trans. Microw. Theory Tech, Nov. 1999, No. 11, vol. 47, pp. 2059-2074.
10. *Numan A.B. and Shoravi M.S.* Extraction of material parameters of metamaterials using a full-wave simulator // IEEE Antenna and Propagations Magazine, Oct. 2013, No. 5, vol. 55, pp. 202-2011.