

# АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТАМАТЕРИАЛОВ И ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ

**Кухаренко Александр Сергеевич,**

к.т.н., с.н.с, Филиал открытого акционерного общества

"Объединенная ракетно-космическая корпорация"

"Научно-исследовательский институт космического приборостроения",

Москва, Россия, [alexk.05@mail.ru](mailto:alexk.05@mail.ru)

**Елизаров Андрей Альбертович,**

д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет

"Высшая школа экономики", Москва, Россия,

[a.yelizarov@hse.ru](mailto:a.yelizarov@hse.ru)

**Ключевые слова:** метаматериал, расширение полосы, полосо-запирающие структуры, частотно-селективные устройства, грибовидные структуры.

Одним из перспективных путей развития современной электродинамики и электроники СВЧ является исследование метаматериалов, представляющих собой композитные соединения, свойства которых обусловлены искусственно созданной периодической системой из макроскопических элементов. Однако эти структуры обладают общим недостатком – узкой рабочей полосой, что объясняется их резонансными свойствами. Проведен анализ физических особенностей метаматериалов и конструкций частотно-селективных СВЧ-устройств, выполненных на основе грибовидных полосо-заграждающих структур. Предложены способы расширения рабочей полосы указанных устройств, заключающиеся в формировании двухслойных или многослойных топологических структур, в которых слои образованы импедансными частотно-селективными поверхностями. Первый предложенный способ получения такой поверхности заключается в создании дополнительного слоя проводящих пластин, имеющих омический контакт с металлизированными переходными отверстиями, которые в свою очередь также имеют омический контакт с пластинами верхней импедансной поверхности и с плоскостью заземления. Второй предложенный способ заключается в формировании промежуточной импедансной поверхности из периодически расположенных на плоскости вложенных кольцевых разомкнутых резонаторов. Причем такие резонаторные кольца располагаются в промежуточном слое структуры непосредственно под верхними пластинами концентрически вокруг металлизированного переходного отверстия, не имея омического контакта с ним, диаметр внешнего кольца не превышает длины верхней пластины. Показано, что использование в конструкциях грибовидных полосо-заграждающих структур промежуточных импедансных поверхностей позволяет создавать СВЧ-устройства на основе объемных метаматериалов с расширенной полосой пропускания и возможностью ее перестройки, а также многодиапазонные частотно-селективные устройства. С использованием программных средств AWR Design Environment (Microwave Office v.9.0) выполнено численное моделирование таких СВЧ-устройств, демонстрирующее эффект расширения рабочей полосы, и приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие их соответствие с результатами моделирования. Показано, что интерес к исследованию грибовидных полосо-заграждающих структур обусловлен перспективностью их использования для создания частотно-селективных СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками, в частности, специальных экранов отсечки многолучевости прецизионных антенн для систем геодезии и навигации, а также пространственных фильтров для развязки элементов в антенных решетках.

## Для цитирования:

Кухаренко А.С., Елизаров А.А. Анализ физических особенностей метаматериалов и частотно-селективных СВЧ-устройств на их основе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Том 9. – №5. – С. 36-41.

## For citation:

Kukharenko A.S., Yelizarov A.A. Analysis of metamaterial physical features and constituted frequency-selective devices . T-Comm. 2015. Vol 9. No.5, pp. 36-41. (in Russian).

**Введение**

Современный этап исследования физических свойств метаматериалов подтверждает их преимущества при создании частотно-селективных поверхностей, развязывающих фильтров, экранов и покрытий, обеспечивающих радиомаскировку, и других СВЧ-устройств [1-3].

Метаматериал с грибовидной структурой впервые описан Сивенпайпером в работе [4]. Он конструктивно представляет 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.

Интерес к исследованию грибовидных полосо-заграждающих структур обусловлен перспективностью их использования для создания частотно-селективных СВЧ-устройств с улучшенными характеристиками, в частности, специальных экранов отсечки многолучевости и прецизионных антенн для систем геодезии и навигации [5], а также пространственных фильтров для развязки элементов в антенных решетках [6].

Однако, наряду с обладанием уникальными свойствами [2, 3], грибовидные метаматериалы имеют существенный недостаток – узкую рабочую полосу, что объясняется их резонансной природой. Настоящая работа посвящена анализу физических особенностей грибовидных метаматериалов и методов расширения полосы заграждения частотно-селективных СВЧ-устройств на их основе.

**1. Грибовидные полосо-заграждающие структуры**

Распределенные колебательные контуры грибовидного метаматериала (рис.1) могут быть представлены эквивалентной схемой (рис.2), 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.

При расположении параллельно рассматриваемым поверхностям СВЧ-излучателя, например, горизонтального вибратора, в нем возникает зеркально отраженный ток, эквивалентный наличию второго излучателя. Причем этот ток будет противофазен току при наличии импедансной металлической поверхности, и синфазен в случае поверхности, образованной метаматериалом. Таким образом, при синфазных токах, наличие отражения усиливает излучение вибратора, а при противофазных токах излучение вибратора будет компенсироваться. Следует также подчеркнуть еще одно преимущество метаматериала – поверхностный ток не затекает на обратную сторону экранированной диэлектрической платы, что полностью уничтожает обратное излучение, всегда возникающее в излучающей структуре с импедансной металлической поверхностью [7].

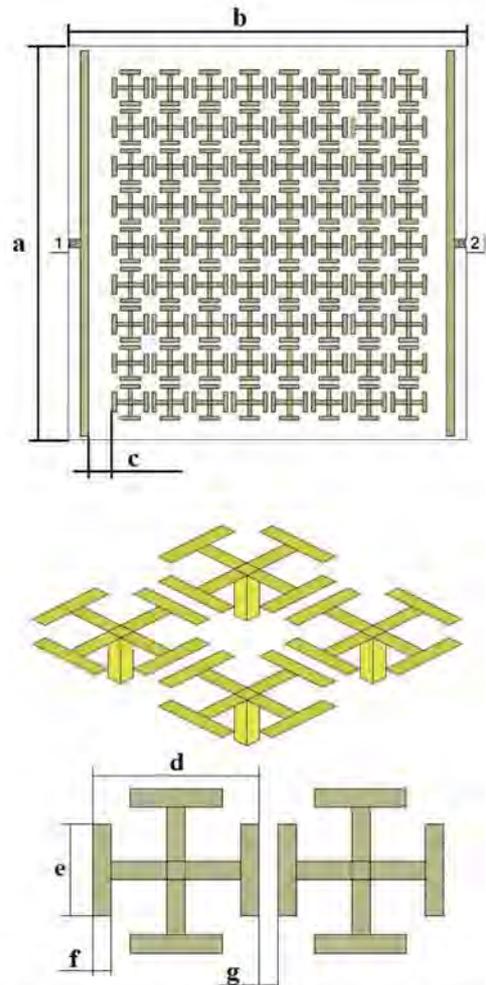


Рис. 1. Грибовидная полосо-запирающая структура. Размеры: a=b=100 мм; c=7 мм; d=9 мм; e=5 мм; f=g=1 мм

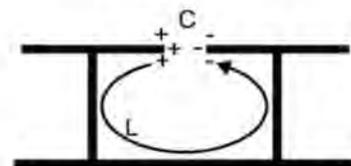
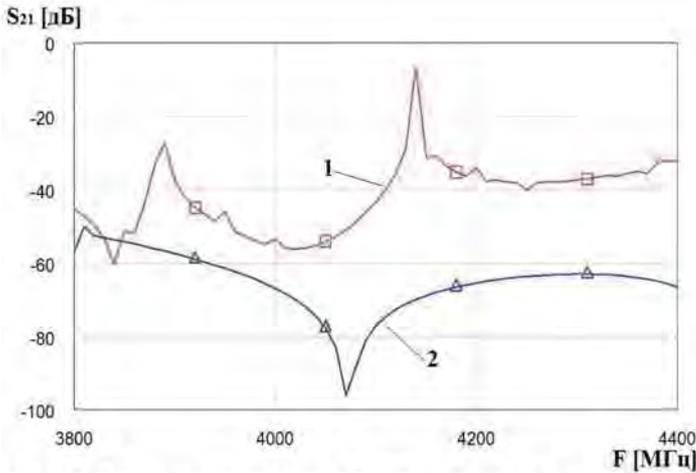


Рис. 2. Образование эквивалентных индуктивности и емкости между двумя распределенными колебательными контурами

Частотно-селективные свойства метаматериала подтверждаются результатами численного эксперимента, полученными с помощью программных средств AWR Design Environment (Microwave Office v.9.0). На рис.3 показаны зависимости комплексного коэффициента передачи  $S_{21}$  от частоты, полученные для структуры с импедансной металлической поверхностью (кривая 1) и частотно-селективной структуры с топологией, выполненной по рис.1 на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 4,4$  и толщиной 2 мм (кривая 2).

Сравнение данных характеристик показывает более чем тысячекратный рост затухания колебаний у метаматериала (95,9 дБ против 50,8 дБ, обеспечиваемых импедансной металлической поверхностью) на частоте резонанса структуры 4070 МГц.

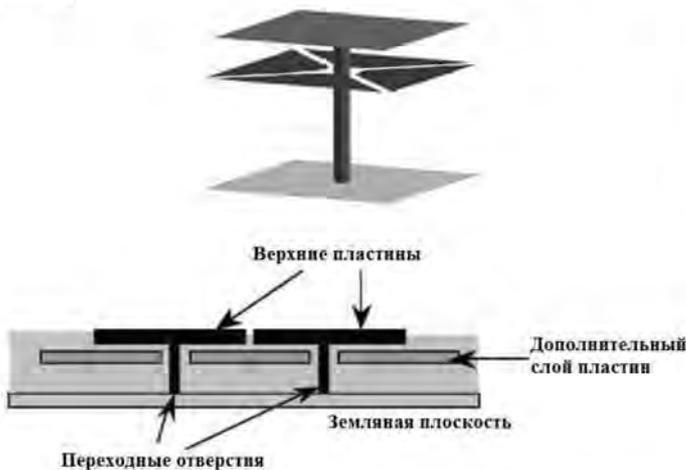


**Рис. 3.** Зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты для импедансной металлической поверхности (1) и полосно-заграждающей структуры на метаматериале (2)

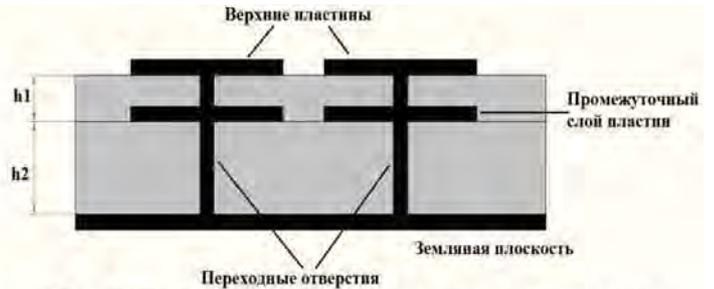
## 2. Грибовидные полосно-заграждающие структуры с расширенной полосой

Резонансная природа метаматериала не позволяет, к сожалению, обеспечивать развязку в широкой полосе частот. Так рассмотренная выше конструкция частотно-селективной СВЧ-структуры обеспечивает полосу заграждения 37 МГц по уровню (-80) дБ.

В работе [8] А. Санадой, К. Калосом и Т. Ито была описана грибовидная полосно-заграждающая структура, в которой между «шляпками грибов» и земляной плоскостью вводился дополнительный слой периодически расположенных проводящих пластин, не имеющих омического контакта ни между собой, ни с металлизированными переходными отверстиями (рис. 4). За счет влияния этих пластин, эквивалентная емкость между соседними элементами структуры увеличивается, что приводит к уменьшению резонансной частоты полосно-заграждающей структуры в целом при сохранении ее геометрических размеров. Однако этот прием не позволяет расширить рабочую полосу.



**Рис. 4.** Грибовидная полосно-заграждающая структура с дополнительным слоем периодически расположенных проводящих пластин



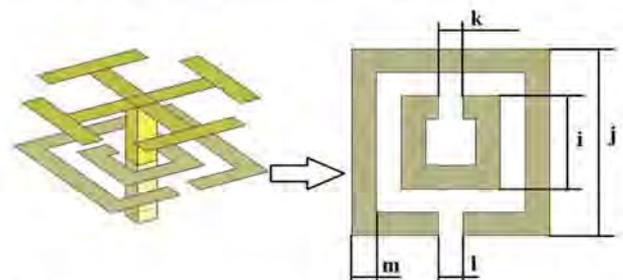
**Рис. 5.** Грибовидная структура с расширенной полосой заграждения

Одним из возможных способов расширения рабочего диапазона частотно-селективных СВЧ-устройств на основе грибовидных полосно-заграждающих структур является использование двухслойной диэлектрической подложки, в которой под верхними проводящими пластинами расположен дополнительный слой пластин такой же формы и размера, и также имеющих омический контакт с металлизированными переходными отверстиями (рис. 5).

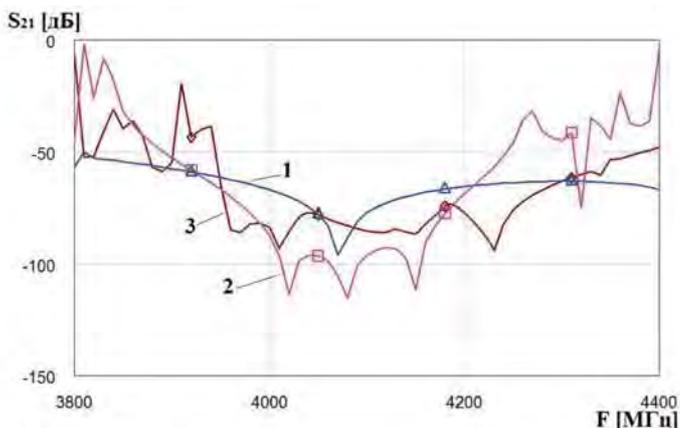
Предлагаемая конструкция представляет собой две последовательно включенные грибовидные структуры, отличающиеся лишь длинами металлизированных переходных отверстий, которые определяют эквивалентные индуктивности контуров. Так эквивалентная индуктивность  $L1$  определяется суммарной толщиной подложек  $h1+h2$ , а эквивалентная индуктивность  $L2$  – толщиной диэлектрической подложки  $h2$ . В общем случае  $h1$  не равно  $h2$ . Таким образом, имея разные значения эквивалентных индуктивностей, структуры имеют различные, но близкие друг к другу резонансные частоты, которые совместно образуют более широкую полосу заграждения по сравнению с полосой обычной грибовидной структуры.

## 3. Частотно-селективные СВЧ-устройства на объемных метаматериалах

Другим способом расширения рабочей полосы частотно-селективных СВЧ-устройств на основе высокоимпедансных поверхностей является применение многослойных печатных плат с расположенными в промежуточных слоях (между каждым колебательным контуром и экраном) проводниками в виде кольцевых разомкнутых резонаторов, представляющих собой вложенные друг в друга и разомкнутые с противоположных сторон изолированные кольца или многоугольники (рис. 6) [1-3, 9].



**Рис. 6.** Конструкция частотно-селективного СВЧ-устройства на метаматериале с кольцевыми разомкнутыми резонаторами. Размеры:  $i=4$  мм;  $j=8$  мм;  $k=l=m=1$  мм



**Рис. 7.** Зависимости параметра  $S_{21}$  от частоты для полосно-заграждающих структур на однослойном (1), двухслойном (2) метаматериале и метаматериале с промежуточным слоем резонаторных колец (3)

Объединение нескольких высокоимпедансных топологических поверхностей формирует объемный композитный метаматериал, на основе которого могут быть созданы многодиапазонные или широкополосные частотно-селективные СВЧ-устройства, обладающие расширенной полосой заграждения и возможностью ее перестройки.

На рис. 7 показаны результаты численного моделирования полосно-заграждающей структуры с топологией распределенных колебательных контуров, изображенной на рис. 6 (кривая 3), в сравнении с топологией по рис. 5 (кривая 2) и по рис. 1 (кривая 1). Во всех трех случаях структуры имели одинаковые геометрические размеры, включая размеры крестообразных проводников. Относительная диэлектрическая проницаемость материала подложек  $\epsilon = 4,4$ , толщина – 2 мм.

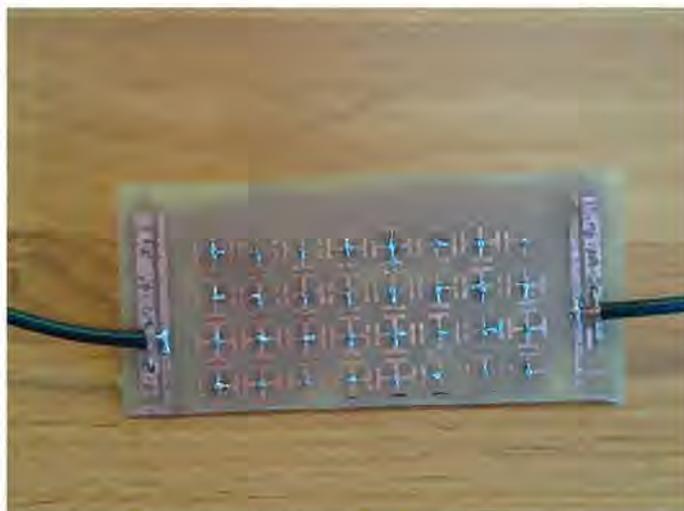
Сравнение результатов расчета показывает, что структура по рис. 5 имеет больший по сравнению с традиционной грибовидной конструкцией уровень затухания до (-115,2) дБ, и обеспечивает развязку на уровне (-80) дБ в полосе заграждения 3986-4175 МГц. Таким образом, введение в метаматериал дополнительного слоя проводящих пластин позволило в 5 раз (до 189 МГц) расширить рабочую полосу структуры без изменения ее габаритных размеров.

Полосно-заграждающая структура на метаматериале с кольцевыми разомкнутыми резонаторами демонстрирует рабочую полосу 3957-4242 МГц при затухании 80-94,7 дБ. Тем самым достигается более чем семикратное расширение полосы заграждения – до 285 МГц по сравнению с традиционной грибовидной конструкцией.

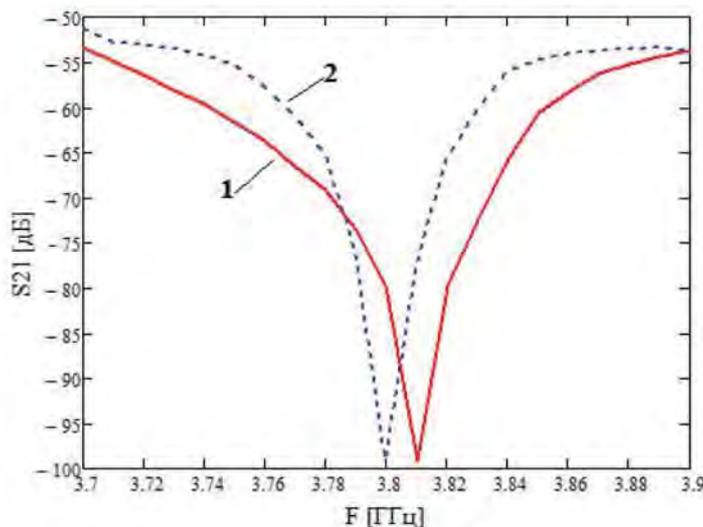
**4. Экспериментальное исследование частотно-селективного СВЧ-устройства на метаматериале**

Экспериментальное исследование одного из рассмотренных выше частотно-селективных СВЧ-устройств на метаматериале выполнено с помощью векторного анализатора ZVB-4 компании Rodhe & Schwarz. Макет однослойной грибовидной полосно-заграждающей структуры, изготовленный на основе печатной платы из стеклотекстолита ( $\epsilon = 4,6$ ) с габаритными размерами 100x50 мм и

толщиной 2 мм, показан на рис. 8. Геометрические размеры крестообразных проводников соответствуют рис. 1.



**Рис. 8.** Экспериментальный макет полосно-заграждающей структуры на метаматериале



**Рис. 9.** Зависимости комплексного коэффициента передачи от частоты для макета полосно-заграждающей структуры на метаматериале: 1 – рассчитанная численно в программе AWR, 2 – полученная экспериментально

Результаты численного моделирования (кривая 1), выполненного с помощью AWR Design Environment (Microwave Office v.9.0) и эксперимента (кривая 2), показаны на рис. 9. Сравнительный анализ полученных кривых показывает, что затухание комплексного коэффициента передачи  $S_{21}$ , полученное численно, составляет 99,2 дБ на резонансной частоте 3810 МГц, а измеренное экспериментально – 99,0 дБ на частоте 3801 МГц. Разница в резонансных частотах составляет 9 МГц (0,25%), что вызвано погрешностями изготовления макета и находится в допустимых пределах. Следовательно, полученные результаты компьютерного моделирования можно считать достоверными.

### Заключение

В работе предложены два оригинальных способа расширения рабочей полосы грибовидных метаматериалов без увеличения их габаритных размеров. Первый из них заключается в формировании между импедансной и земляной поверхностями метаматериала дополнительной импедансной поверхности, топология которой повторяет по форме и размеру проводящий рисунок, формирующий первую импедансную поверхность, и расположена строго под ней.

Другой способ заключается в формировании промежуточной импедансной поверхности из периодически расположенных на плоскости непосредственно под пластинами, формирующими верхнюю импедансную поверхность, вложенных кольцевых разомкнутых резонаторов, не имеющих омического контакта ни между собой, ни с верхними пластинами, ни с металлизированным переходным отверстием. Такая структура позволяет создавать не только широкополосные, но и многодиапазонные метаматериалы.

При помощи численного моделирования наглядно продемонстрирован эффект расширения в 5-7 раз полосы запыриания частотно-селективных СВЧ-устройств, выполненных на основе предложенных метаматериалов, по сравнению с аналогичными устройствами на основе традиционной грибовидной конструкции. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность данных численного моделирования.

### Литература

1. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журнал технической физики. – 2013. – Т.83. – Вып.1. – С.3-28.
2. 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.
3. Engheta N., Ziolkowsky R. W. Metamaterials – physics and engineering exploration. Danvers: John Wiley & Sons Inc., 2006. – 414 p.
4. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.J., Alexopolous N.G., Yablono-vitch E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Trans. MTT. – 1999. – Vol. 47. – № 11. – P.2059-2074.
5. Бойко С.Н., Веселаго В.Г., Виноградов Е.А., Жуков А.А. Малогабаритные антенны на основе метаматериалов (практические аспекты) // Антенны, 2012. – № 12. – С. 32-41.
6. Бойко С.Н., Елизаров А.А., Закирова Э.А., Кухаренко А.С. Исследование малогабаритного развязывающего СВЧ фильтра на метаматериале // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2014», Саратов, 2014. – Т.1. – С.218-225.
7. Froozesh A., Shafai L. Investigations into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas. // IEEE Trans. AP. – 2011. – Vol.59. – №1, pp.4-20.
8. Sanada A., Caloz C., Itoh T. Planar distributed structures with negative refractive index // IEEE Trans. MTT. – 1999. – Vol. 52. – № 4, pp.1252-1263.
9. 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.

**softline**<sup>®</sup>



Services Software Cloud

ИТ-архитектура  
вашего бизнеса



## ANALYSIS OF METAMATERIAL PHYSICAL FEATURES AND CONSTITUTED FREQUENCY-SELECTIVE DEVICES

**Kukharenko A.S.**, Russia, Moscow, [alexk.05@mail.ru](mailto:alexk.05@mail.ru)

**Yelizarov A.A.**, Russia, Moscow, [a.yelizarov@hse.ru](mailto:a.yelizarov@hse.ru)

### Abstract

One of modern electrodynamics and microwave electronics evolution ways is investigation of metamaterials, which are composite unions, which properties are caused by artificially made periodic macro element system. But these structures have an overall mismatch - a narrow working band, which is caused by its resonant nature. An analysis of metamaterial physical properties and constructions of frequency-selective microwave devices, based on mushroom-type band-gap structures is presented. Ways of the mentioned devices band width extension which are in forming double or multilayer structures, where layers are formed by impedance frequency-selective structures, are suggested. The first suggested way is forming an additional layer of conducting plates having a contact with vias, which also have a contact with top impedance surface plates and with ground plane. The second suggested way is to form the middle impedance plane from resonant inserted rings, periodically placed on a plane. Resonant rings should be placed in the middle layer of the structure under the top plates concentrically around the via, having no contact with them, the external ring diameter shouldn't be larger than the plate length. It is shown, that using of middle impedance surfaces in mushroom-type band-gap constructions allows creating microwave devices based on 3-D metamaterials with extended bandwidth and a possibility of its readjusting and also multiband frequency-selective devices creation. Using AWR Design Environment (Microwave Office v.9.0) software a numerical analysis of microwave devices demonstrating a band width extension effect is made, and experimental data matching with the numerical analysis are shown. It is shown, that an interest to mushroom-type frequency-selective structures investigation is caused by perspective of using such devices for creation of frequency-selective microwave devices with better characteristics, in particular of special multipath mitigating ground planes for navigation systems and square filters for antenna element decoupling in antenna arrays.

**Keywords:** metamaterial, bandwidth extension, EBG structures, frequency-selective devices, mushroom-type structures.

### References

1. Vendik I.B., Vendik O.G. Ghurnal tehnikeskoy fiziki, 2013. Vol.83. No.1, pp.3-28. (in Russian).
2. 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.
3. Engheta N., Ziolkowsky R.W. Metamaterials – physics and engineering exploration, Danvers, John Willey and sons inc., 2006. 414 p.
4. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.J., Alexopolous N.G., Yablonovitch. E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band, IEEE Trans. MTT. 1999. Vol. 47. No. 11, pp. 2059-2074.
5. Boyko S.N., Veselago V.G., Vinogradov Y.A., Ghukov A.A., Antenny. 2012. No 12, pp. 32-41. (in Russian).
6. Boyko S.N., Yelizarov A.A., Zakirova E.A., Kukharenko A. S. APEP-2014 conference, Saratov. 2014. Vol. 1, pp. 218-225. (in Russian).
7. Froozesh A., Shafai L. Investigations into the application of artificial magnetic conductors to bandwidth broadening, gain enhancement and beam shaping of low profile and conventional monopole antennas. IEEE Trans. AP. 2011. Vol. 59. No. 1, pp. 4-20.
8. Sanada A., Calos C., Itoh T. Planar distributed structures with negative refractive index. IEEE Trans. MTT. 1999. Vol. 52. No 4, pp.1252-1263.
9. 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.

**Information about authors:** Kukharenko A.S., Ph. D., head researcher, Branch of "United Rocket and Space Corporation" "Institute of Space Device Engineering", Moscow, Russia.

Yelizarov A.A., Ph. D., professor, National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia.

### For citation:

Kukharenko A.S., Yelizarov A.A. Analysis of metamaterial physical features and constituted frequency-selective devices . T-Comm. 2015. Vol 9. No.5, pp. 36-41. (in Russian).