

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХ СПЛИТ-КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

В.Н.Лобекин, М.И.Бичурин, Е.А.Зуева

APPLICATION OF METASTRUCTURE BASED ON FOUR SPLIT-RING RESONATORS

V.N.Lobekin, M.I.Bichurin, E.A.Zueva

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, slavalobekin@gmail.com

Представлена возможность применения метаматериалов на основе сплит-кольцевых резонаторов в качестве микрополоскового полосового фильтра. Приведена конструкция метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов для разных частот и эквивалентная схема подключения резонаторов. Проведено компьютерное моделирование первоначального варианта метаструктуры, полученные амплитудно-частотные характеристики позволили подобрать оптимальные параметры и размеры метаструктуры для проведения дальнейшего моделирования с целью сведения резонансных характеристик всех резонаторов к общей резонансной характеристике. Моделирование проводилось с помощью инструмента для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ полей HFSS Ansoft. Полученные амплитудно-частотные характеристики для конечного варианта конструкции метаструктуры подтверждают возможность использования ее для разработки микрополоскового фильтра, а также для дальнейшего изучения данной метаструктуры с включением ферритовых элементов для электронной перестройки устройства.

Ключевые слова: метаматериалы, сплит-кольцевой резонатор, метаструктура

Для цитирования: Лобекин В.Н., Бичурин М.И., Зуева Е.А. Применение метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.43-46. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46)

The article presents the possibility of using metamaterials based on split ring resonators as a microstrip bandpass filter. The construction of a metastructure based on four split-ring resonators for different frequencies and an equivalent circuit for connecting the resonators are presented. Computer simulation of the initial version of the metastructure was carried out, the obtained amplitude-frequency characteristics made it possible to select the optimal parameters and dimensions of the metastructure for further modeling, in order to reduce the resonance characteristics of all resonators to a common resonance characteristic. Simulations were carried out using the HFSS Ansoft 3D RF / Microwave simulation tool. The obtained amplitude-frequency characteristics for the final version of the metastructure design confirm the possibility of using this metastructure for the development of a microstrip filter, as well as for further study of this metastructure with the inclusion of ferrite elements for electronic restructuring of the device.

Keywords: metamaterials, split-ring resonator, metastructure

For citation: Lobekin V.N., Bichurin M.I., Zueva E.A. Application of metastructure based on four split-ring resonators // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.43-46. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).43-46](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46)

Введение

Изучению метаматериалов в настоящее время посвящено большое количество работ, так как за счет своих уникальных свойств, не встречающихся в природе, они представляют огромный интерес к изучению и применению. Метаматериалы — искусственные материалы, содержащие периодический массив субволновых включений, известные как сплит-кольцевые резонаторы. Обычно сплит-кольцевой резонатор рассматривают как LC-резонансный контур, индуктивность и емкость которого зависят от его формы и размеров. Применяются различные формы сплит-кольцевых резонаторов: π -форма, S-форма, U-форма, сплит-H-форма и другие. Эти резонаторы могут вместе демонстрировать макроскопически наблюдаемые эффективные значения диэлектрической ($\epsilon < 0$) и магнитной проницаемости ($\mu < 0$), которые не встречаются в природе и широко используются для измерения различных характеристик материалов.

Электромагнитные свойства метаматериалов расширили область их применения, например линии передачи [1], СВЧ-датчики [2,3], фильтры [4-9], антенны [10] и др. Кроме того, метаструктура на основе сплит-кольцевого резонатора применяется вместо пассивной части СВЧ-устройств с включением ферритового резонатора ЖИГ в форме диска или сферы для электронной перестройки с помощью магнитного поля [11].

В данной работе рассматривается возможность применения метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов в качестве микрополоскового фильтра.

Конструкция метаструктуры

Для первоначального моделирования выбрана метаструктура на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов, представленная на рис.1. Конструкция выполнена на подложке керамического ламината Duroid 6010.2LM размерами 30×24 мм и толщиной 1,9 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2 и тангенсом угла диэлектрических по-

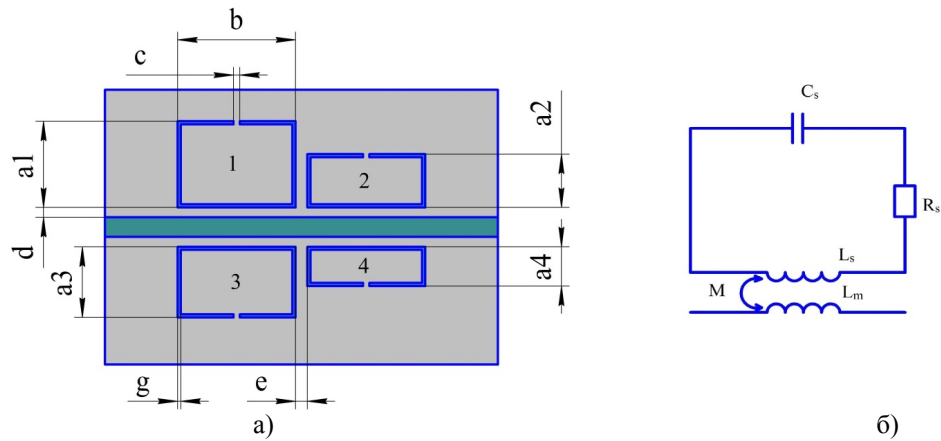


Рис.1. Структура метаматериалов на основе сплит-кольцевых резонаторов: а) конструкция метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов, $a_1 = 8$ мм, $a_2 = 6$ мм, $a_3 = 4,5$ мм, $a_4 = 3$ мм, $b = 7$ мм, $c = 0,15$ мм, $d = 0,65$ мм, $e = 2$ мм, $g = 0,2$ мм; б) эквивалентная электрическая схема

терь 0,0023. Микрополосковая линия передачи является элементом возбуждения с волновым сопротивлением 50 Ом, сплит-кольцевой резонатор и заземление выполнено из меди с толщиной металлизации 0,035 мм. Размеры сплит-кольцевого резонатора также представлены на рис.1. На эквивалентной схеме изображен последовательный RLC резонансный контур, где в зазоре SRR образуется емкость C_s , а контур SRR соответствует индуктивности L_s .

Расположение сплит-кольцевого резонатора в непосредственной близости от микрополосковой линии позволяет создать магнитное поле вокруг себя при распространении квази-ТЕМ-волны. Это магнитное поле индуцирует циркулирующий ток в контуре сплит-кольцевого резонатора. В квазистатическом представлении сплит-кольцевой резонатор может быть аппроксимирован индуктивностью и емкостью в виде последовательного LC-резонаторного контура. В частности, сам резонатор образует индуктивность, а зазор в резонаторе — емкость. Резонанс имеет место в сплит-кольцевом резонаторе, когда энергия, накопленная в емкости, сбалансирована с магнитной энергией, накопленной в индуктивности. На рис.2 представлена амплитудно-частотная характеристика структуры метаматериалов, полученная в результате первоначального моделирования.

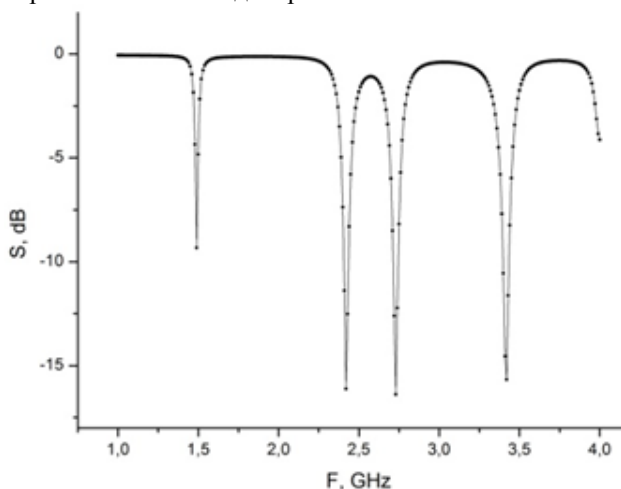


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика структуры метаматериалов на основе сплит-кольцевых резонаторов

Для использования данной метаструктуры, представленной на рис.1, в качестве микрополоскового фильтра необходимо свести резонансные характеристики всех сплит-кольцевых резонаторов, представленные на рис.2, к единой характеристике. Для этого в данной структуре предпринято подобрать оптимальные размеры сплит-кольцевых резонаторов и привести размеры всех сплит-кольцевых резонаторов к единым.

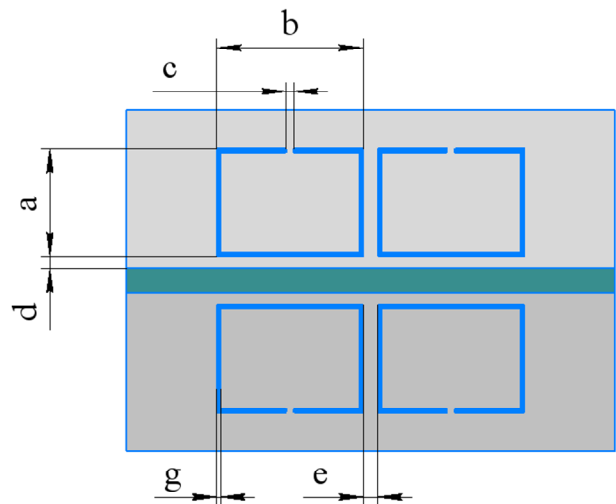


Рис.3. Метаструктура на основе четырех-сплит кольцевых резонаторов, $a = 5$ мм, $b = 7$ мм, $c = 0,15$ мм, $d = 0,65$ мм, $e = 2$ мм, $g = 0,2$ мм

Полученная метаструктура в результате расчета и дальнейшего подбора оптимальных параметров представлена на рис.3.

Компьютерное моделирование метаструктуры

HFSS — инструмент для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ электромагнитных полей. Ansys HFSS является отраслевым стандартом программного обеспечения для численного электродинамического моделирования. Базовым алгоритмом в Ansys HFSS является метод конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке, реализованный в частотной области для расчета поведения электромагнитных полей на произвольной геометрии с заданными свойствами материалов.

Ansys HFSS позволяет извлекать матричные параметры СВЧ-структуры (S -, Y -, Z -матрицы); рассчитывать коэффициент стоячей волны (КСВ); извлекать параметры излучения и рассеяния (диаграммы направленности, коэффициенты направленного действия, реализуемое усиление антенн, ЭПР и др.); отображать в 3D распределение токов, векторов плотности потока мощности, распределения электромагнитных полей (в ближней и дальней зонах); генерировать полноволновую SPICE-модель пассивного изделия для передачи в программы SPICE-класса или во встроенный схемный редактор для последующего анализа схем и систем низкочастотного диапазона, а также высокоскоростных и СВЧ-конструкций.

В результате проведения компьютерного моделирования метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов получена амплитудно-частотная характеристика, представленная на рис.4.

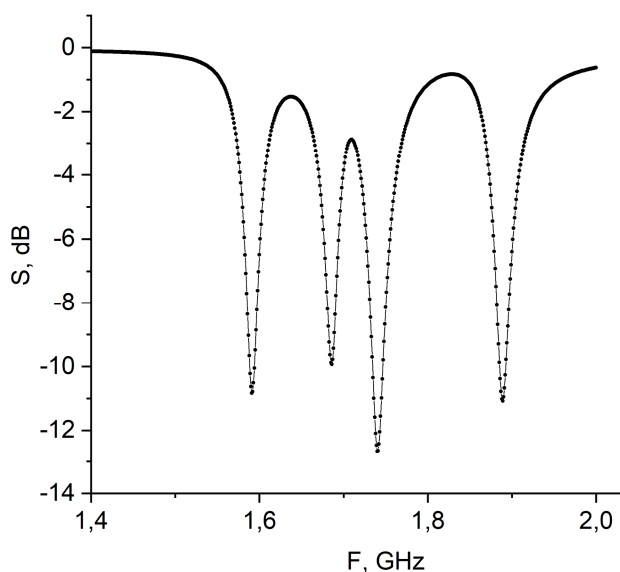


Рис.4. Амплитудно-частотная характеристика структуры метаматериалов на основе сплит-кольцевых резонаторов

На рис.4 виден сдвиг по частоте всех резонансных характеристик сплит-кольцевых резонаторов к частоте 1,7 ГГц. Также наблюдается сужение частотного диапазона амплитудно-частотной характеристики с 2 ГГц до 0,3 ГГц по сравнению с амплитудно-частотной характеристикой метаструктуры, представленной на рис. 2. Результата удалось достичь за счет изменения размеров сплит-кольцевых резонаторов метаструктуры, представленной на рис.3, и приведения к единым размерам, а также за счет изменения связи между сплит-кольцевыми резонаторами, что и повлияло на частотный сдвиг всех резонансных характеристик. Полученные результаты подтверждают возможность использования метаструктуры, представленной на рис. 3, в качестве микрополоскового фильтра, но необходимо проведение дополнительного исследования и анализа параметров и размеров всех сплит-кольцевых резонаторов метаструктуры и их резонансных характеристик для сведения всех резонансных характеристик к единой.

Заключение

В статье рассмотрена метаструктура на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов и ее применение в качестве микрополоскового фильтра. Проведено компьютерное моделирование метаструктуры, выполнен сравнительный анализ полученных амплитудно-частотных характеристик. Полученный результат показывает сдвиг по частоте резонансных характеристик всех сплит-кольцевых резонаторов метаструктуры и сужение частотного диапазона амплитудно-частотной характеристики, что является актуальным для применения данной метаструктуры в качестве микрополоскового фильтра. Для улучшения результата планируется провести ряд расчетов параметров метаструктур для определения оптимальных размеров структуры. Изменение связи между микрополосковой линией передачи, являющейся элементом возбуждения, и сплит-кольцевыми резонаторами тоже позволит повлиять на частотный сдвиг резонансных характеристик сплит-кольцевых резонаторов метаструктуры. Наряду с этим планируется провести исследование данной метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов с включением ферритовых элементов в форме диска или сферы для электронной перестройки с помощью магнитного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00391.

1. Gil M., Bonache J., Selga J. et al. Broadband resonant-type metamaterial transmission lines // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2007. Vol.17. №2. P.97-99. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890327>
2. Withayachumnankul W., Jaruwongrunsee K., Tuantranont A. et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization // Sensors Actuators A: Physical. 2013. Vol.189. P.233-237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.027>
3. Naqui J., Durán-Sindreu M., Martín F. Alignment and position sensors based on split ring resonators // Sensors. 2012. Vol.12. №9. P.11790-11797. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120911790>
4. Al-Naib I.A.I., Jansen C., Koch M. Single metal layer CPW metamaterial bandpass filter // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2010. Vol.17. P.153-161. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERL10081103>
5. Liu J. C., Shu D.-S., Zeng B. H., Chang D.-C. Improved equivalent circuits for complementary split-ring resonator-based high-pass filter with C-shaped couplings // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2008. Vol.2. №6. P.622-626. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map:20070306>
6. Mondal P., Mandal M., Chakrabarty A., Sanyal S. Compact bandpass filters with wide controllable fractional bandwidth // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2006. Vol.16. №10. P.540-542. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.882401>
7. Gil M., Bonache J., García-García J. et al. Composite right/left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split-rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2007. Vol.55. № 6. P.1296-1304. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.897755>
8. Luo X., Qian H., Ma J.-G., Li E. Wideband bandpass filter with excellent selectivity using new CSRR-based resonator // Electron. Lett. 2010. Vol.46. №20. P.1390-1391. DOI: <https://doi.org/10.1049/el.2010.1817>
9. Liu J.-C., Lin H.-C., Zeng B.-H. et al. An improved equivalent circuitmodel for CSRR-based bandpass filter design with even and odd modes // IEEE Microw.Wireless Compon. Lett. 2010. Vol.20. №4. P.193-195. DOI: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2042548>

10. Hossain M.I., Faruque M.R.I., Islam M.T., Ali M.T. Design and analysis of coupled-resonator reconfigurable antenna // *Applied Physics A*. 2016. Vol.122. Article number: 2. P.4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9520-6>
 11. Лобекин В.Н., Татаренко А.С., Бичурин М.И. Компьютерное моделирование метаструктуры с ферритовым элементом // *Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки*. 2020. №2(118). С.40-42. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).40-42](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).40-42)
- References**
1. Gil M., Bonache J., Selga J., García-García J., and Martín F. Broadband resonant-type metamaterial transmission lines. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 97-99. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890327>
 2. Withayachumnankul W., Jaruwongrunsee K., Tuantranont A., Fumeaux C., and Abbott D. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors Actuators A: Physical*, 2013, vol. 189, pp. 233-237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.027>
 3. Naqui J., Durán-Sindreu M., and Martín F. Alignment and position sensors based on split-ring resonators. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 9, pp. 11790-11797. doi: <https://doi.org/10.3390/s120911790>
 4. I. A. Al-Naib, C. Jansen, and M. Koch. Single metal layer CPW metamaterial bandpass filter. *Progress Electromag. Research Letters*, 2010, vol. 17, pp. 153-161. doi: <https://doi.org/10.2528/PIERL10081103>
 5. Liu J. C., Shu D.-S., Zeng B. H., and Chang D.-C. Improved equivalent circuits for complementary split-ring resonator-based high-pass filter with C-shaped couplings. *IET Micro-*
 6. waves, *Antennas & Propagation*, 2008, vol. 2, no. 6, pp. 622-626. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-map:20070306>
 6. Mondal P., Mandal M., Chaktabarty A., and Sanyal S. Compact bandpass filters with wide controllable fractional bandwidth. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2006, vol. 16, no. 10, pp. 540-542. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.882401>
 7. Gil M., Bonache J., García-García J., Martel J., and Martín F. Composite right/left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split-rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2007, vol. 55, no. 6, pp. 1296-1304. doi: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.897755>
 8. Luo X., Qian H., Ma J.-G., and Li E. Wideband bandpass filter with excellent selectivity using new CSRR-based resonator. *Electron. Lett.*, 2010, vol. 46, no. 20, pp. 1390-1391. doi: <https://doi.org/10.1049/el.2010.1817>
 9. Liu J.-C., Lin H.-C., Zeng B.-H., Yeh K.-D., and Chang D.-C. An improved equivalent circuit model for CSRR-based bandpass filter design with even and odd modes. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 193-195. doi: <https://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2042548>
 10. Hossain M. I., Faruque M. R. I., Islam M. T., Ali M. T. Design and analysis of coupled-resonator reconfigurable antenna. *Applied Physics A*, 2016, v. 122, art. no. 2, 4 p. doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-015-9520-6>
 11. Lobekin V.N., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. Komp'yuternoye modelirovaniye metastruktury s ferrito-vym elementom [Computer modeling of metamaterials with ferrite element]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences*, 2020, no. 2(118), pp. 40-42. doi: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2\(118\).40-42](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.2(118).40-42)