

06.3

Радиопоглощающий метаматериал и экран антенны на его основе

© Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, С.В. Поленга

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: ryazantsevro@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2021 г.

В окончательной редакции 20 августа 2021 г.

Принято к публикации 20 августа 2021 г.

Исследован радиопоглощающий метаматериал, располагаемый вблизи сплошной металлической поверхности, и разработана конструкция антенны для приема спутниковых навигационных сигналов с использованием предлагаемого материала в составе поглощающего экрана. Разработана структура, исследованы частотные характеристики методом конечных элементов в частотной области, установлены рабочие размеры элементов исследуемого метаматериала для применения в составе поглощающего экрана. Выполнены моделирование и анализ диаграммы направленности для антенны с поглощающим экраном в сравнении с антенной на классическом высокоимпедансном экране. Сделаны выводы о применимости предлагаемой структуры метаматериала.

Ключевые слова: антенна ГНСС, радиопоглощающий метаматериал, высокоимпедансный экран.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51778.18947

Метаматериалы находят все большее применение в антенной технике. В частности, с использованием искусственных материалов выполняются экраны высокоточных антенн для приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. Техническая реализация метаматериала основывается на классических работах [2,3], и в таком случае метаматериал представляет собой комбинацию разомкнутых совмещенных кольцевых резонаторов и близкорасположенных линейных проводников. Данная среда позволяет создать одновременно отрицательные магнитную и диэлектрическую эффективные проницаемости и, что является интересным в свете данного исследования, работать с электромагнитной волной без значительных отражений от границы раздела среды. Использование такой реализации в виде решетки единичных элементов в пространстве, но с интегрированными поглощающими элементами возможно и известно [4]. Однако непосредственное использование такого варианта для работы в составе антенны ГНСС оказалось невозможным вследствие необходимости работы метаматериала в непосредственной близости от металлического экрана при нормальном к экрану типе поляризации, которая подлечит поглощению при небольших размерах единичного элемента метаматериала.

В настоящей работе исследован поглощающий метаматериал с целью улучшения электрических характеристик антенн при применении его в составе экранов антенных конструкций.

Для формирования специальных свойств экранов антенн ГНСС также известно применение структур Electromagnetic Bandgap (EBG), в том числе с использованием свойств метаматериалов [5], однако это сопряжено с технологическими трудностями, заключающимися в необходимости прямого электрического контакта структуры и металлического экрана.

Поглощающий метаматериал, разработанный по результатам исследования, выполнен по типу метаматериалов на основе разомкнутых кольцевых резонаторов, однако имеет особенности в том смысле, что не требует непосредственного контакта проводящих элементов с металлическим экраном и не содержит протяженных линейных проводников в топологии структуры.

В результате исследований был обнаружен эффект, заключающийся в том, что при соответствующей ориентации однокольцевого резонатора вблизи экрана существует область частот, в которой рассматриваемая периодическая структура обладает свойствами метаматериала. При этом разрез проводящего кольца ориентирован к экрану, а электромагнитное взаимодействие структуры кольца осуществляется с полем падающей волны, поляризация которой ортогональна экрану. Нагрузка резонаторного кольца резистором позволяет осуществлять поглощение электромагнитной волны, при этом свойства метаматериала позволяют осуществлять поглощение в отсутствие значительного уровня отражения сигнала. Единичная ячейка структуры представлена на рис. 1, а. Кольцевые резонаторы могут быть изготовлены с помощью печатной технологии на распространенном диэлектрическом материале FR-4. В качестве резисторов могут быть использованы промышленные тонкопленочные компоненты поверхностного монтажа, применимость которых оговаривается производителем для работы на частотах порядка единиц и десятков гигагерц [6].

Расчет параметров отражения и поглощения выполнен путем анализа периодической структуры посредством моделирования методом конечных элементов в фиксированных частотных точках. Центральной рабочей частотой поглощения в исследовании была выбрана 1575 MHz — центральная частота одного из диапазонов ГНСС. Исходя из графиков S-параметров модели эле-

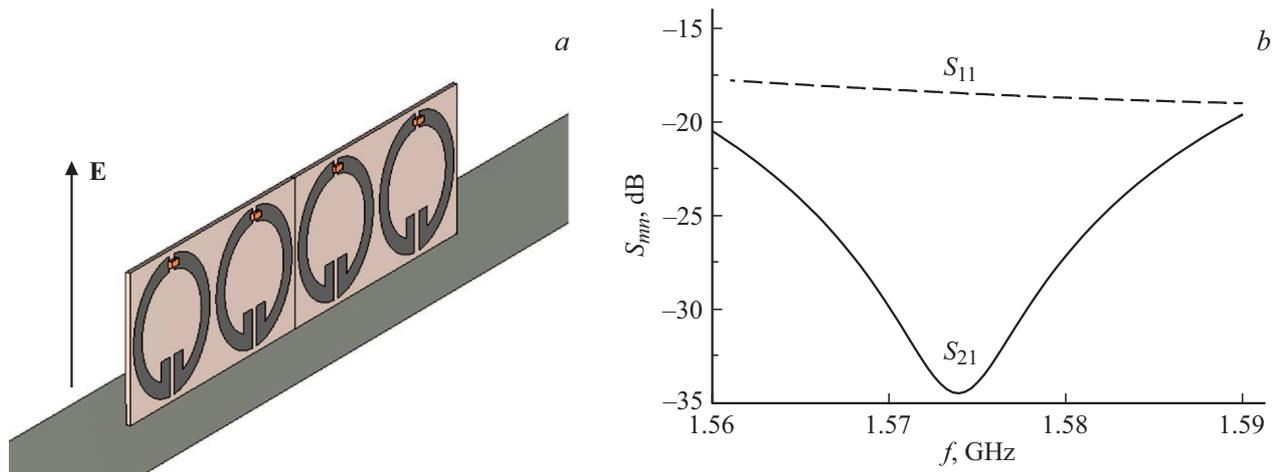


Рис. 1. *a* — элементарная ячейка для расчета электромагнитных свойств структуры. *b* — частотная зависимость S -параметров модели элементарной ячейки исследуемого метаматериала.

ментарной ячейки поглощающей структуры (рис. 1, *b*) можно утверждать, что исследуемая периодическая структура демонстрирует низкий уровень коэффициента отражения и низкий уровень коэффициента прохождения вблизи резонансной частоты, что эквивалентно высокому значению коэффициента поглощения.

В исследовании были рассчитаны параметры метаматериала, такие как относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости. Для вычисления данных параметров использовались выражения из работы [7]. По итогам расчета эквиваленты действительных компонент на центральной рабочей частоте составили $\epsilon = -1.6$, $\mu = -1.1$. Результаты расчета параметров относительных проницаемостей были верифицированы через анализ модели ячейки в тех же граничных условиях, состоящей из заполненного объема сплошного материала с заданными значениями проницаемостей.

В рассматриваемом случае с целью увеличения коэффициента эллиптичности диаграммы направленности антенны при работе на углах, близких к горизонту, предполагается поглощение поляризационной составляющей, перпендикулярной плоскости экрана антенны, подобно тому, как в классических антеннах ГНСС с гофрированным фланцем (choke ring) осуществляется подавление распространения E -компоненты падающей электромагнитной волны [8].

Ряды резонансных поглощающих элементов (32 пластины) метаматериала, расставленные по металлическому экрану квадрупольной антенны, составляют поглощающий экран, который предназначен для поглощения компоненты поля антенны с поляризацией, нормальной к экрану. Изометрический вид антенны для приема сигналов ГНСС с поглощающим экраном представлен на рис. 2, *a*.

Диаграммы направленности (ДН) основной и кросс-поляризационной составляющих для круговой поляризации антенны, экран которой выполнен в виде гофрированного металлического фланца, и антенны с

исследуемым поглощающим метаматериалом в целом схожи (рис. 2, *b*). Значительная разница наблюдается за пределом рабочих углов, около направления в 180° , где антенна с поглощающим экраном имеет значительно больший (~ -10 dB) уровень приема кросс-поляризованной составляющей. Однако данный факт ожидаемо не принесет ухудшений в точность определения координат при приеме сигналов ГНСС при геодезических приложениях.

Более информативным является сравнение зависимостей коэффициента эллиптичности (axial ratio) для антенн с экранами различного типа, которые приведены на рис. 3 (в том числе для антенны с простым сплошным металлическим экраном — flat metal).

Известно, что при рассмотрении работы антенн высокоточного применения для приема сигналов ГНСС наиболее критичной проблемой являются многолучевое распространение [9] и подавление приема отраженных сигналов. В наиболее критичном диапазоне углов модель антенны с предлагаемым поглощающим экраном демонстрирует некоторое преимущество: коэффициент эллиптичности для углов ДН вблизи 90° составляет около 0.78, тогда как для антенны с металлическим гофрированным фланцем (три кольца) он равен 0.68.

Антенна с предлагаемым типом поглощающего экрана отличается меньшими размерами: высота экрана предлагаемого типа составляет 19 mm, в случае антенны с гофрированным фланцем — 48 mm. Высота антенны с экраном предлагаемого типа определяется высотой излучателя и в модели составляет 40 mm, высота антенны с фланцем определяется суммой высот излучателя и фланца и в модели составляет 88 mm. Диаметры экранов антенн были выбраны близкими для обеспечения корректности сравнения (270 и 280 mm для антенны с метаматериалом и для антенны с фланцем соответственно).

Таким образом, исследования показывают, что реализация экрана антенны для приема сигналов ГНСС с использованием разработанного поглощающего мета-

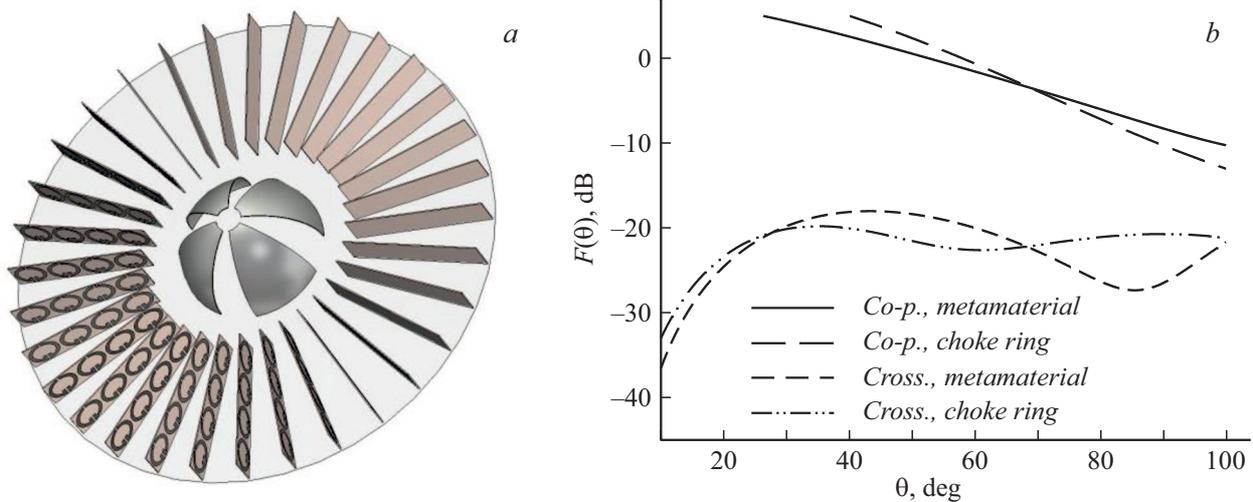


Рис. 2. *a* — изометрический вид антенны для приема сигналов ГНСС с поглощающим экраном на основе исследуемого метаматериала. *b* — ДН антенн в секторе рабочих углов. *Co-p.* — основная поляризация, *Cross.* — кросс-поляризация.

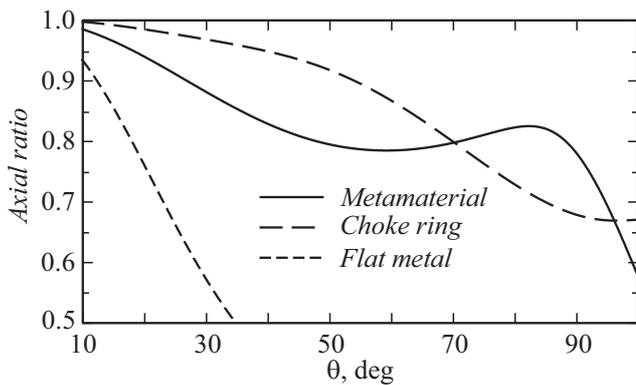


Рис. 3. Зависимости коэффициента эллиптичности для антенн с различными типами экранов.

материала является конкурентоспособной и позволяет при высоком уровне электрических характеристик, как минимум, улучшить массогабаритные параметры подобных антенн. Также такой вариант поглощающего экрана является экономически целесообразным вследствие использования распространенного и недорогого диэлектрического материала FR-4 и технологии изготовления печатных плат.

Представленное исследование имеет перспективы в части расширения рабочей полосы частот метаматериала (либо формирования отдельной второй полосы) за счет использования второй стороны диэлектрического материала, на которой может быть размещена аналогичная структура с параметрами, обеспечивающими ее работу на отстоящей частоте. Кроме того, возможно рассмотрение вариации технологии изготовления с использованием проводящих чернил вместо медного слоя и резисторов, что позволит использовать подобные структуры на значительно более высоких частотах [10].

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-240003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Trimble Zephyr 3 (datasheet)* (Trimble, Inc., 2017). <https://geospatial.trimble.com/>
- [2] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Phys. Rev. Lett.*, **84** (18), 4184 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4184
- [3] R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz, S.C. Nemat-Nasser, *Appl. Phys. Lett.*, **78** (4), 489 (2001). DOI: 10.1063/1.1343489
- [4] J. Tak, Y. Lee, J. Choi, *J. Electromagn. Eng. Sci.*, **13** (1), 1 (2013). DOI: 10.5515/JKIEES.2013.13.1.1.1
- [5] A. Yelizarov, A. Kukhareno, in *German Microwave Conf. (GeMiC)* (Bochum, Germany, 2016), p. 271. DOI: 10.1109/GEMIC.2016.7461608
- [6] *Frequency response of thin film chip resistors* (Vishay Intertechnology, Inc., 2009), document number 601074, revision: 04-Feb-09. <https://www.vishay.com/>
- [7] X. Chen, T.M. Grzegorzczak, B.-I. Wu, J. Pacheco, Jr., J.A. Kong, *Phys. Rev. E*, **70** (1), 016608 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016608
- [8] J.M. Tranquilla, J.P. Carr, H.M. Al-Rizzo, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **42** (7), 905 (1994). DOI: 10.1109/8.299591
- [9] *Springer handbook of global navigation satellite systems*, ed. by P.J.G. Teunissen, O. Montenbruck (Springer, Berlin, 2016). DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1_4
- [10] P. Tiwari, S.K. Pathak, V.P. Anitha, in *2020 IEEE Int. Conf. on computational electromagnetics (ICCEM)* (IEEE, 2020), p. 243. DOI: 10.1109/ICCEM47450.2020.9219409