

УДК 537.86

ЭКРАНИРУЮЩИЙ КОЛПАК С РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МЕТАМАТЕРИАЛОМ ВНУТРИ

В. Н. Семененко¹, К. М. Басков¹, А. А. Политико¹, Д. И. Акимов¹, Н. Н. Степанов²

¹Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

²Акционерное общество «Воронежский научно-исследовательский институт «Вега»,
394026, г. Воронеж, Московский проспект, д.7-Б

Статья поступила в редакцию 17 января 2018 г.

Аннотация. Представлены исследования метаматериала, представляющего собой резонансные включения из нагруженных колец, обладающего поглощающими свойствами на ультравысоких частотах. Показано, что такие включения могут быть использованы для изготовления поглощающего материала, работающего вблизи резонансной частоты этих включений. Показано практическое применение метаматериала в экранирующем колпаке с датчиком, который может быть применён при диагностике антенных систем. Представлены результаты расчетов коэффициента стоячей волны вибраторной антенны в экранирующем колпаке с метаматериалом и без него. Приведены результаты измерений радиотехнических характеристик опытного образца экранирующего колпака с метаматериалом. Результаты исследований, представленные в статье, были доложены на «V Всероссийской микроволновой конференции».

Ключевые слова: метаматериал, радиопоглощающий материал, ультравысокие частоты, резонансные включения, коэффициент стоячей волны.

Abstract. The paper deals with the results of investigation of metamaterial exhibiting radar absorbing properties at microwave frequencies owing to the resonant phenomena in metallic inclusions. In particular, inclusions are investigated in the form of conducting isolated nichrome wire rings with twisted edges. It is demonstrated that such wire inclusions may be used to prepare materials exhibiting radar absorbing properties at certain frequencies in the vicinity of the resonant frequency of the inclusions. The practical applications of such metamaterial

exhibiting radar absorbing properties at frequency 300 MHz were shown. In particular, it is performed significant reduction of standing wave coefficient of dipole antenna inside a shielding cover (up to 2.0 at the frequency band 290-315 MHz). The shielding covers with a sensor are widely used for the antenna-feeder systems diagnosis. The results of the experiments showed that the influence of the metamaterial on the shielding of antenna and the level of the transmitted signal from the antenna to the sensor is negligible. A numerical simulation of such metamaterial was performed by calculation using the FEKO software package of electromagnetic simulation. It is shown that the uneven distribution of the electric field is located at the resonant elements. Therefore, the position of the resonant elements relative to the antenna has a significant influence on the standing wave coefficient of antenna inside the shielding cover. The main advantages of the investigated metamaterial are ease of fabrication, high thermal stability and the resistance to the external influencing factors. The results of the research have been reported at «5-th all-Russian Microwave Conference».

Key words: metamaterial, radar-absorbing material, ultra high frequencies, resonant inclusions, standing wave coefficient.

1. Введение

Высокие темпы развития антенной техники ставят перед инженерами и учёными все более сложные задачи по совершенствованию современного антенного оборудования. Реализация новых требований по таким параметрам, как эффективность, надежность и функциональность, невозможна без использования качественно новых подходов. Одно из перспективных направлений в развитии антенной техники связано с достижениями в области создания так называемых метаматериалов – композиционных материалов с необычными физическими свойствами. В частности, такие материалы могут обладать как отрицательной диэлектрической проницаемостью, так и отрицательной магнитной проницаемостью [1], в отличие от обычных материалов. Особенность метаматериалов обусловлена резонансным

взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в среде, наполненной элементами определенной формы и размера, обеспечивающими резонансное возбуждение токов в этих элементах. Одно из первых упоминаний в литературе об использовании метаматериалов в качестве радиопоглотителей имеется в [2]. Резонансные элементы могут быть самых разных форм, например, выполнены в виде проволок разного размера [3], разорванных колец или проводов, скрученных в спирали [4 - 6]. В [7] описаны свойства механически прочного метаматериала с диэлектрической проницаемостью близкой к единице, который может быть эффективен при производстве радиопрозрачных укрытий. Исследования диэлектрических слоёв с компенсационными сетками из проводов, которые также могут считаться метаматериалами, проводились ещё в середине 20 века [8], но тогда такие конструкции считались дифракционными решётками. После работ Веселаго В.Г. [1] дифракционные решётки с малыми по отношению к длине волны элементами стали называть метаматериалами.

В данной работе представлены численные и экспериментальные исследования в полосе частот 200...400 МГц метаматериала, состоящего из резонансных включений из нагруженных колец. Такие включения представляют собой разорванные кольца из изолированной нихромовой проволоки со скрученными концами. Скрутки концов проволок являются сосредоточенными емкостными нагрузками колец (рис. 1 и 2). В частности, в данной работе показывается, что такие включения могут быть использованы для изготовления поглощающего материала, работающего вблизи резонансной частоты этих включений. Исследования проводились расчётным путём методом интегральных уравнений с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO. Далее по тексту под методом моментов будем понимать, что электродинамический расчёт системы проводится методом интегральных уравнений, которые решаются методом моментов.

Также, в работе представлена проверка экспериментальным путём поглощающих свойств метаматериала при использовании его вместо

традиционного радиопоглощающего материала (РПМ). Как будет показано, такой метаматериал может быть эффективен при использовании его в экранирующем металлическом колпаке с датчиком. Экранирующие колпаки широко применяются в антенной технике при диагностике антенно-фидерных систем. При установке экранирующего колпака на антенну сильно увеличивается коэффициент стоячей волны (КСВ) в её фидерном тракте, что, в свою очередь, мешает проведению диагностики. Для снижения влияния экранирующего колпака на КСВ антенны традиционно используют РПМ. В качестве альтернативы традиционного РПМ предлагается использовать метаматериал, который достаточно прост в изготовлении и дешев.

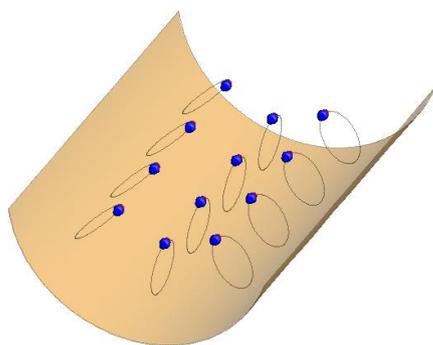


Рис. 1. Трехмерная модель метаматериала (место емкостной нагрузки обозначено синей точкой).



Рис. 2. Фотография нагруженного разорванного кольца – резонансного включения метаматериала.

2. Компьютерное моделирование экранирующего колпака с метаматериалом

Модель метаматериала с резонансными включениями представляла собой слой двумерной периодической структуры из проволочных колец. Диаметр моделируемой проволоки был выбран 0,4 мм, а проводимость материала проволоки 1 МСм/м, что соответствует проводимости нихрома. Для

моделирования скрутки концов проволок в кольцо включалась емкостная нагрузка, как показано на рис. 1.

Настройка метаматериала на необходимую резонансную частоту достигалась выбором значения емкостных нагрузок и диаметра проволочных колец. Выбор указанных параметров осуществлялся по рассчитанным частотным зависимостям коэффициента пропускания (КП) бесконечной двумерно периодической решётки из колец с периодами 75×75 мм. Расчет КП проводился в пакете программ FEKO методом моментов с использованием периодических граничных условий, с тонкопроволочным приближением и с применением граничных условий Леонтовича. Оптимизация значения емкостных нагрузок и диаметра проволочных колец по рассчитанным значениям КП производилась с помощью инструментов, доступных в пакете программ FEKO. В результате вычислений было получено, что метаматериал, обладающий резонансом на частоте 300 МГц, должен состоять из колец с диаметром 46,8 мм и с емкостной нагрузкой 1,8 пФ.

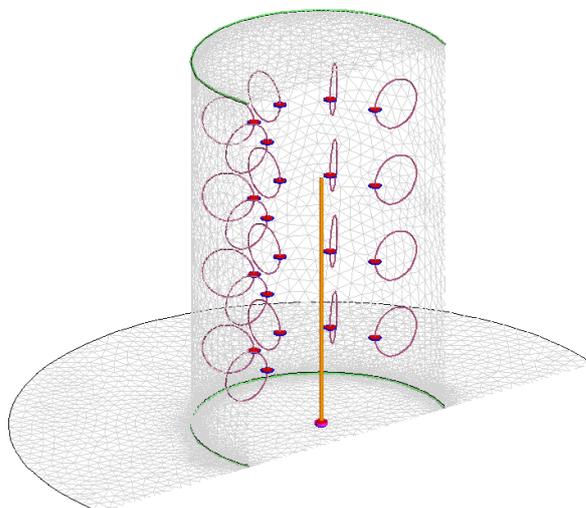


Рис. 3. Модель (разрез) в программе FEKO четвертьволновой вибраторной антенны, укрытой экранирующим колпаком с метаматериалом из резонансных элементов в виде разорванных колец со скрученными концами.

Для проверки возможного использования метаматериала для поглощения энергии электромагнитного поля в экранирующем колпаке были проведены расчеты коэффициента стоячей волны (КСВ) четвертьволновой вибраторной антенны, укрытой металлическим цилиндром. В металлический цилиндр помещались элементы метаматериала, как показано на рис. 3. Кольца в количестве 32 штук моделировались таким образом, чтобы магнитное поле антенны было ортогонально плоскости колец. Антенна моделировалась штырём из идеального проводника длиной 243 мм и диаметром 4 мм, установленным на металлическом диске диаметром 600 мм. При таких параметрах антенна обладает минимальным значением КСВ на частоте 300 МГц. Расчет проводился методом моментов.

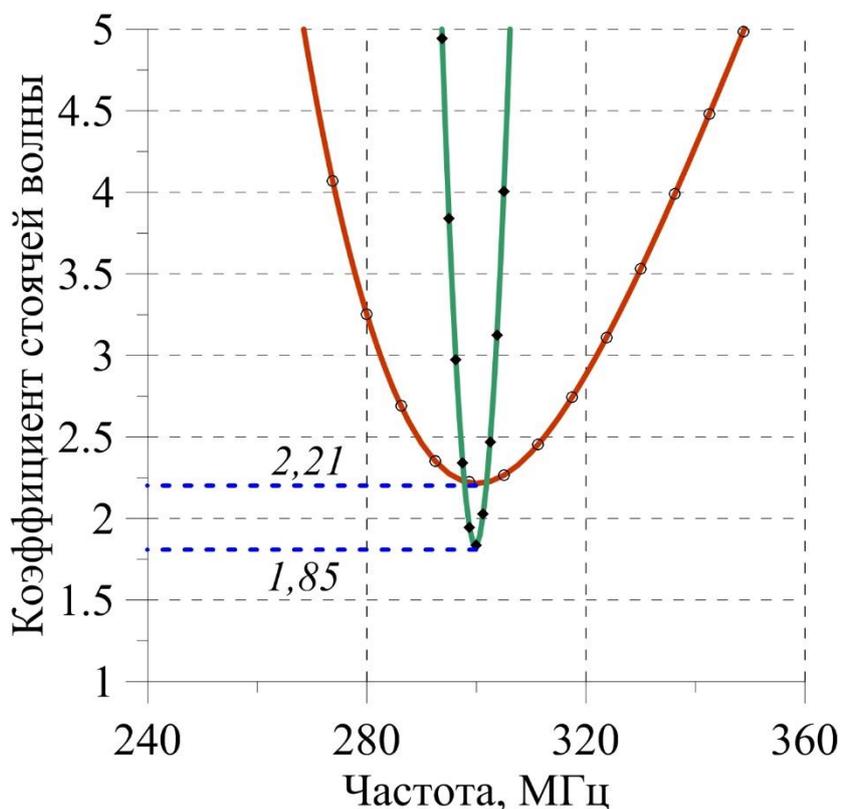


Рис. 4. Рассчитанные КСВ четвертьволновой антенны: в случае излучения в свободное пространство (красная линия); в случае, когда на антенну установлен экранирующий колпак с метаматериалом (зелёная линия).

Для оценки влияния метаматериала на радиотехнические характеристики экранирующего колпака были проведены расчеты КСВ антенны, излучающей в

свободное пространство, и КСВ антенны, укрытой металлическим цилиндром с метаматериалом. Результаты расчетов приведены на рис. 4, где мы видим, что значение КСВ антенны, укрытой цилиндром с метаматериалом (зелёная линия), на частоте 300 МГц составляет 1,85. Следует отметить, что КСВ антенны, укрытой цилиндром без РПМ, стремится к бесконечности. Таким образом, благодаря резонансному поглощению энергии волны в метаматериале, обеспечивается существенное снижение КСВ антенны в экранирующем колпаке.

Результаты расчёта позволяют заключить, что метаматериал из резонансных элементов в виде разорванных колец с емкостной нагрузкой может быть использован в качестве эффективного поглощающего материала в экранирующем колпаке. Это позволяет минимизировать влияние экранирующего колпака на аппаратуру при проведении её диагностики.

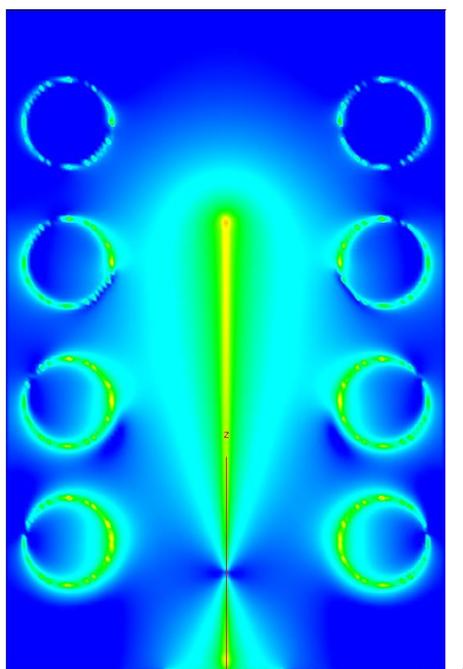


Рис. 5. Распределение поля внутри экранирующего колпака: синий цвет соответствует минимальным значениям концентрации поля, зелёный цвет соответствует средним значениям электрического поля, а красный – максимальным.

Далее был исследован характер взаимодействия проволочных элементов

метаматериала с электромагнитной волной внутри экранирующего колпака. На рис. 5 показано распределение поля в сечении колпака. На рисунке синий цвет соответствует минимальным значениям электрического поля, зелёный цвет соответствует средним значениям электрического поля, а красный – максимальным.

Наибольшие значения электрического поля наблюдаются в области нижнего ряда колец метаматериала. Следовательно, место установки нижнего ряда колец максимально влияет на радиотехническое качество экранирующего колпака с радиопоглощающим метаматериалом. Это оказалось заметным, когда в расчётах и эксперименте определялся оптимальный вариант установки элементов метаматериала внутрь колпака.

3. Результаты измерений

Для проверки эффективности рассчитанного метаматериала был изготовлен опытный образец, в котором исследуемые резонансные элементы метаматериала представляли собой кольца диаметром приблизительно 50 мм из нихромовой проволоки диаметром 0,4 мм со скрученными концами, где сосредоточена емкостная нагрузка. Необходимое число витков на скрутке каждого резонансного элемента метаматериала контролировалось с помощью измерений коэффициента передачи между двумя петлевыми антеннами. При этом в процессе контроля элемент устанавливался в центре между этими антеннами. Изменяя число витков в скрутке, добивались минимума передаваемого сигнала на частоте 300 МГц. Изготовленные элементы крепились на радиопрозрачную основу и располагались внутри экранирующего колпака так же, как в электродинамической модели (рис. 3). Важно отметить, что резонансные элементы устанавливались без электрического контакта со стенкой колпака.

Исследование влияния экранирующего колпака на КСВ антенны проводилось с помощью четвертьволновой вибраторной антенны РТ-7 со встроенной системой согласования. Измерения КСВ антенны проводились с

помощью векторного анализатора цепей R&S ZVL6. На рис. 6 схематически изображен экранирующий колпак с метаматериалом, установленным на антенну.

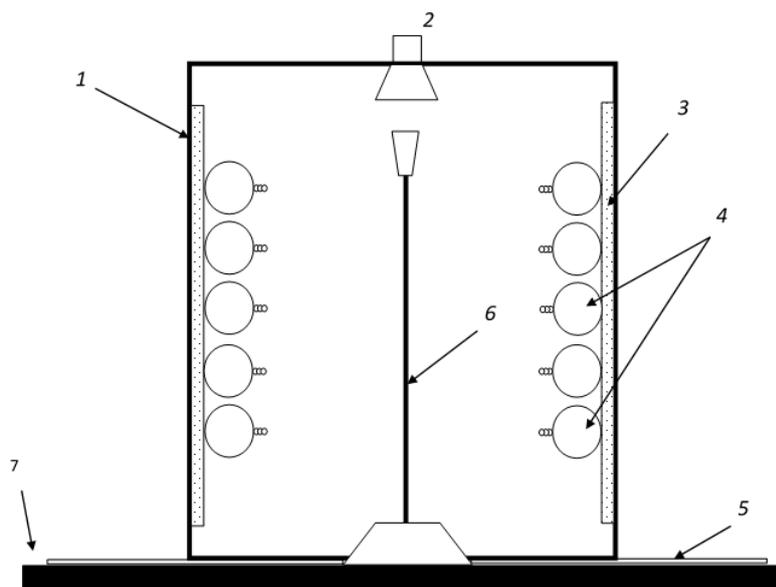


Рис 6. Экранирующий колпак с метаматериалом, установленным на антенну, где 1 - металлический цилиндрический колпак, 2 - датчик, 3 - радиопрозрачная основа, 4 - резонансные кольца, 5 - тонкий слой диэлектрика, 6 - антенна РТ-7, 7 - металлическая пластина.

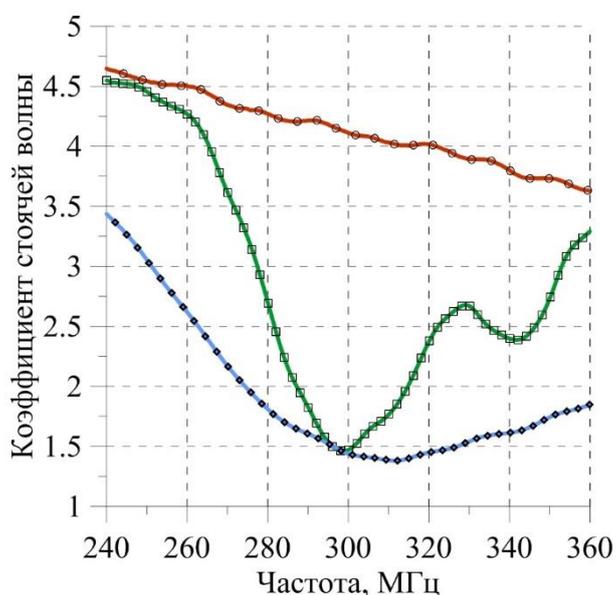


Рис. 7. Частотные зависимости КСВ дипольной антенны в случае излучения в свободное пространство (синяя кривая), КСВ антенны, укрытой экранирующим колпаком с метаматериалом (зелёная кривая) и КСВ антенны, укрытой экранирующим колпаком без метаматериала (красная кривая).

Для того, чтобы оценить влияние экранирующего колпака с изготовленным метаматериалом на характеристики антенны, были измерены частотные зависимости КСВ антенны в случае излучения в свободное пространство, КСВ антенны, укрытой экранирующим колпаком без метаматериала, и КСВ антенны, укрытой экранирующим колпаком с метаматериалом (рис. 7). Как видно из графиков, применение метаматериала позволило достичь значения КСВ антенны не выше 2,0 в рабочей полосе частот 290...315 МГц.

Для оценки влияния метаматериала на другие радиотехнические характеристики экранирующего колпака с помощью векторного анализатора цепей R&S ZVL6 были измерены частотные зависимости уровня его экранирования и уровня передачи сигнала на датчик.

На поверхности объектов, на которых устанавливается антенна РТ-7, может быть лакокрасочное покрытие, приводящее к существенному снижению уровня экранирования колпака. Для макетирования лакокрасочного покрытия между экранирующим колпаком и металлической пластиной, на которой была установлена антенна РТ-7, прокладывались диэлектрические слои (позиция 5 на рис. 5). Для определения уровня экранирования колпака проводились измерения уровней передаваемого сигнала от четвертьволновой антенны РТ-7 на измерительную антенну Пб-62. Измерения проводились в случае излучения антенн в свободном пространстве и в случае, когда на антенну РТ-7 установлен экранирующий колпак с метаматериалом и без него. Результаты измерений частотных зависимостей уровней передаваемого сигнала представлены на рис. 8. Метаматериал в рабочей полосе частот на уровень экранирования колпака не повлиял. Коэффициент экранирования антенны колпаком в рабочей полосе частот составляет величину около минус 30 дБ.

Частотные зависимости уровня сигнала, передаваемого от антенны РТ-7 на датчик экранирующего колпака, представлены на рис. 9. Снижение уровня сигнала, передаваемого от антенны на датчик, при использовании

метаматериала составило всего 4 дБ, что является незначительной величиной, которая может быть учтена при проведении диагностики.

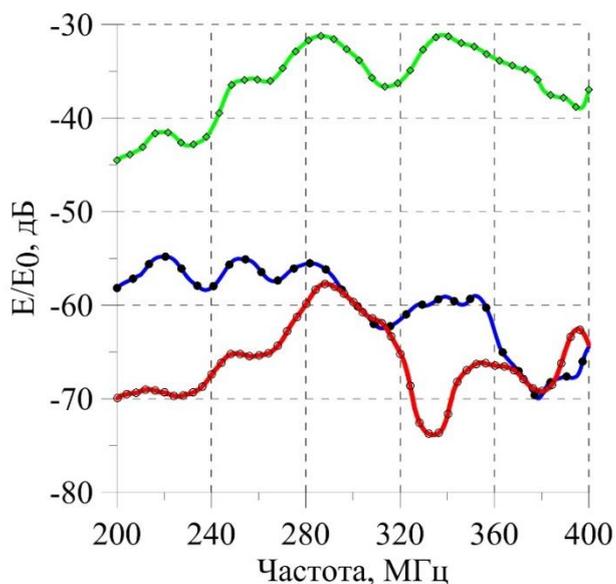


Рис. 8. Частотные зависимости уровня передаваемого сигнала от четвертьволновой вибраторной антенны на измерительную антенну П6-62: не укрытой экранирующим колпаком (зелёная линия), укрытой экранирующим колпаком с метаматериалом (синяя линия), укрытой экранирующим колпаком без метаматериала (красная линия).

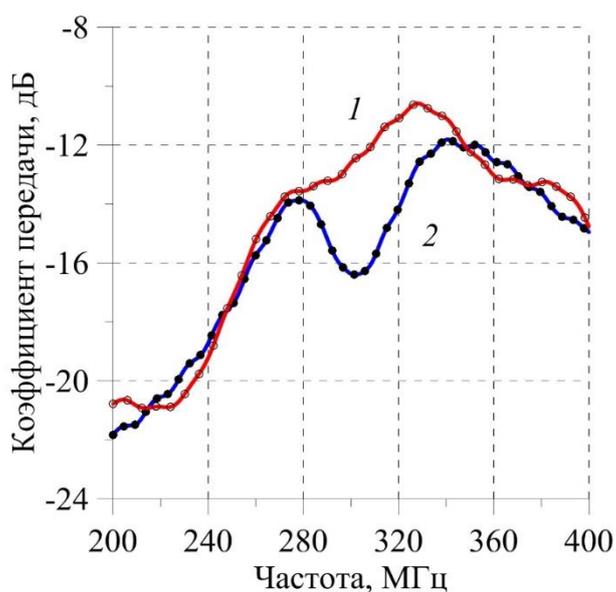


Рис. 9. Частотная зависимость уровня передаваемого сигнала от антенны на датчик в случае установки колпака с метаматериалом (красная линия) и без метаматериала (синяя линия 2).

4. Заключение

В настоящей работе были проведены численные исследования электродинамических свойств метаматериала на основе резонансных колец из нихрома. В ходе исследования было установлено, что такой метаматериал может быть использован вместо традиционного радиопоглощающего материала. Например, установка метаматериала в экранирующий колпак, который используется для диагностики антенно-фидерных устройств, позволяет достигать низких значений КСВ антенны, укрытой этим колпаком. Численно и экспериментально показано, что при установке экранирующего колпака с метаматериалом на антенну в рабочей полосе частот 290...315 МГц наблюдается увеличение её КСВ не более, чем до 2,0. Это позволит проводить более качественную диагностику антенной системы.

Численно показано, что при установке экранирующего колпака с метаматериалом на антенну наблюдается неравномерное распределение поля вблизи элементов метаматериала. Следовательно, положение элементов метаматериала относительно антенны оказывает существенное влияние на радиотехнические характеристики экранирующего колпака.

Результаты экспериментов показали, что влияние метаматериала на уровень экранирования колпака и на уровень передаваемого сигнала от антенны на датчик колпака незначительное.

Следует отметить, что метаматериал из резонансных колец со скрученными концами обладает узкой полосой поглощения, поэтому использование его для задач, где требуется широкополосное поглощение не эффективно. С другой стороны, для задач, где требуется обеспечить поглощение в узкой полосе частот, применение подобного метаматериала может оказаться более эффективным, чем применение традиционного РПМ. Поглощения на разных частотах или расширение полосы поглощения можно добиться чередованием резонансных колец, обладающих резонансом на разных частотах. Основными преимуществами исследованного метаматериала

являются простота изготовления, высокая термостойкость и стойкость к внешним воздействующим факторам.

Литература

1. Veselago V.G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities // Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no 4, pp. 509 - 514, 1968.
2. Kuehl S.A., Grove S.S., Smith A.G. and Theron I.P. Manufacture of microwave chiral materials and their electromagnetic properties // Proceedings of the CHIRAL'95 International Conference, – The Pennsylvania State University, 1995.
3. Антонов А.С., Батенин В.М., Виноградов А.П. и др. Электрофизические свойства перколяционных систем / под ред. Лагарькова А.Н. – М.: ИВТАН, 1990.
4. Костин М.В., Шевченко В.В. Теория искусственных магнетиков на основе кольцевых токов // Радиотехника и электроника, 1992. № 11.
5. Lagarkov A.N., Semenenko V.N., Chistyayev V.A. et al. Resonance Properties of Bi-Helix Media at Microwaves // Electromagnetics, vol. 17, no 3, p. 213, 1997.
6. Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Ryabov D.E. Electromagnetic properties of Composite Magnetic Material in Dependence on Inclusion Concentration // Proceedings of the "Bianisotropics'97" International Conference and Workshop on Electromagnetics of Complex Media, Glasgow, 1997, pp. 285 - 288.
7. Басков К.М. Метаматериал с повышенной механической прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/14/text.pdf>
8. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ – М.: Советское радио, 1974.

Для цитирования:

В. Н. Семененко, К. М. Басков, А. А. Политико, Д. И. Акимов, Н. Н. Степанов. Экранирующий колпак с радиопоглощающим метаматериалом внутри. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/6/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-6