

8. Семенихина Д.В., Семенихин А.И. Нелинейный интеллектуальный рассеиватель с внутренней обратной связью на основе микрополосковой решетки с нагрузками-датчиками // *Нелинейный мир*. – 2009. – № 4. – С. 312-317.
9. Лагарьков А.Н., Погосян М.А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий // *Вестник Российской академии наук*. – 2003. – Т. 73, № 9. – С. 848.
10. www.ansoft.com.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Демшевский Валерий Витальевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств.

Demshevsky Valeriy Vitalievich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: airpu@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters.

УДК 621.372.852.2.

М.М. Мусаев, Н.Н. Кисель

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАСТРУКТУР

В настоящее время все большее внимания стало уделяется использованию метаматериалов с целью расширения рабочих полос и увеличения эффективности работы радиопоглощающих материалов. В связи с этим важным становится вопрос исследования различных моделей метаматериалов с целью повышения эффективности их характеристик [1].

Существует немало публикаций, посвященных исследованию метаструктур, основанных на элементах различной геометрии и ориентации в пространстве [4–8], однако практически не встречаются исследования, посвященные разработке новых метаструктур на основе комбинированных элементов.

В работе рассматривается модель метаструктуры, единичный период которой формируется пространственной ячейкой кубической формы со стороной 5.8 см и содержит включения простейших элементов: квадратный разомкнутый кольцевой резонатор и спираль [9].

Метаматериалы; частотно-селективные поверхности; радиопоглощающий материал.

M.M. Musaev, N.N. Kisel

THE STUDY OF THE ANGULAR CHARACTERISTICS OF METASTRUCTURES.

At present, more and more attention has been paid for using metamaterials in order to increase the working bands and extension of the efficiency of radar absorbing materials. In this connection, the study of various models of metamaterials in order to improve the efficiency of their characteristics becomes an important question [1].

There are many publications devoted to research of metastructures based on the elements of different geometry and orientation in space [4-8], but there are almost no investigations in sphere of development of new metastructures on the basis of the combined elements.

This paper considers the meta-model, a single period of which is formed by spatial cell of the cubic form with a side of 5.8 cm and contains inclusions of the simplest elements: a square open-ring resonator and the spiral [9].

Metamaterials; meta-period; the combination; angular characteristics.

В 2010 г. были реализованы экспериментальные образцы радиопоглощающих структур, включающих в себя частотно-селективные поверхности (ЧСП), которые представляют собой магнитный полимерный композит на основе силиконового эластомера с наполнителями [2]. В качестве ЧСП были применены бипериодические решетки из металлических колец на тонкой полимерной пленке, что позволило оптимизировать характеристики ЧСП при различных ее положениях в радиопоглощающем материале с целью получения максимально широкой рабочей полосы частот. Проведенные в [2] исследования в диапазоне частот $1,0 \dots 17,0$ подтвердили, что применение ЧСП позволяет расширить рабочие частотные диапазоны радиопоглощающих материалов более чем в 1,5 раза практически без увеличения его толщины и веса. Большинство практических применений от экранов до сверхлинз и поляризаторов требуют создания метаматериала с прецизионными трехмерными элементами [3].

Все элементы, формирующие единичный период решетки, относятся к элементам пространственного типа. С целью получения одинакового резонансного отклика для двух поляризаций падающего поля спираль была модернизирована. Элемент модифицированной спирали формируется из двух одновитковых спиралей, радиусом 1,5 см, имеющих левостороннюю и правостороннюю направления намотки, смещенные друг относительно друга на 90° (рис. 1,б). Двойные рамочные включения имеют размеры сторон 4 см и 3 см соответственно и погружены во внутрь ячейки относительно друг друга на 0,4 см, толщина рамки принималась 0,5 см, ширина разрыва разрыв рамки 0,5 см (рис. 1,г) [9].

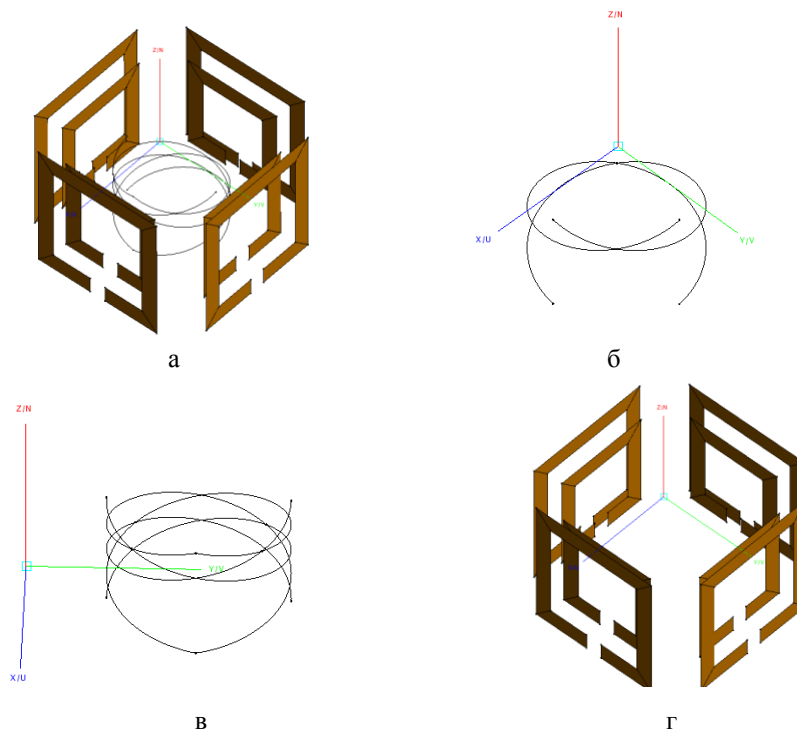


Рис. 1. а – единичный период метаструктуры; б – элемент модифицированной спирали; в – два модифицированных элемента; г – единичный период рамочного экрана

При численном моделировании в пакете FEKO были получены частотные зависимости коэффициента отражения бесконечных периодических структур на основе данных элементов (рис. 2).

Проведено численное исследование экрана с частотно-селективной поверхностью, образованной элементами: спиральными, рамочными, и их комбинацией. Основной целью проведенных исследований является выяснение возможности применения комбинированных экранов с целью снижения отражения от металлической пластины и анализ влияния на отражающие свойства резонансных элементов (спиральных, рамок) в диапазоне частот 1,5–6 ГГц. На рис. 5 приведены расчетные значения ЭПР: для металлической пластины (кривая 1); для металлической пластиной прикрытой спиральным экраном (кривая 2); для металлической пластиной прикрытой рамочным экраном (кривая 3); для металлической пластиной прикрытой комбинированным экраном (кривая 4). Как видно из графика, спиральный экран имеет резонансные отклики на частотах 3,3, 5,5 ГГц; структуры из рамочных элементов аналогичный эффект проявляется на частотах 4,5, 5,8 ГГц; комбинированный экран характеризуется провалами характеристики ЭПР на частотах 3,2, 3,7, 4,5, 5,9 ГГц.

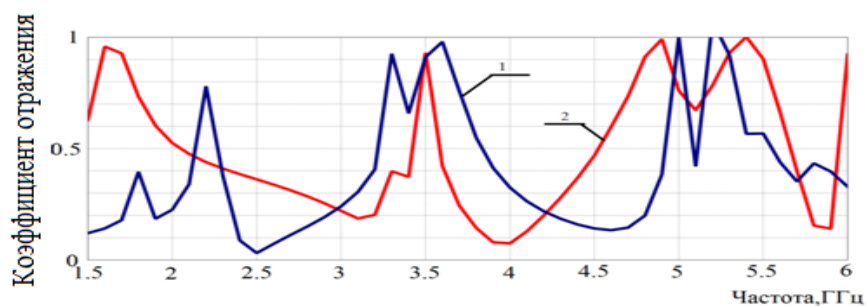


Рис. 2. Частотные зависимости частотно-селективной поверхности на основе комбинированных элементов (кривая 1 – коэффициент отражения от рамочного экрана; 2 – коэффициент отражения от спирального экрана)

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки. Исследование структур проводилось в полосе частот от 1,5 ГГц до 7 ГГц с шагом 50 МГц.

В данной работе основное внимание уделено исследованию угловых характеристик метаструктур. В качестве модели воздействия был выбран уголкового отражатель, со стороной 50 см. Одна из граней уголкового отражателя последовательно закрывалась: РПМ, метаструктурой на основе рамочных элементов, модифицированных спиралей, комбинированной структуры, состоящей из рамочных элементов и спиралей, рис. 4.

На рис. 5,а представлена картина, соответствующая нормальному падению волны на поверхность среды. В данном случае за эталон принят РПМ, имеющий ослабление порядка 10 дБ в исследуемой полосе, при нормальном падении волны. Как видно из рисунка, наиболее интересным представляется поведение исследуемых структур в полосе от 2,5 ГГц до 3 ГГц и от 4,5 ГГц до 6 ГГц. Целью исследования представляется возможность сохранения свойств снижения ЭПР метаструктурами при изменении угла падения относительно нормали к поверхности среды.

При повороте уголкового отражателя на 5° участок от 2,5 ГГц до 3 ГГц уровень снижения ЭПР практически не изменяется, сохраняется максимальное значение эффективности подавления. В экспериментальных кривых присутствует небольшая деформация характеристик спиральной и соответственно комбинированной структуры, содержащей аналогичные спиральные элементы.

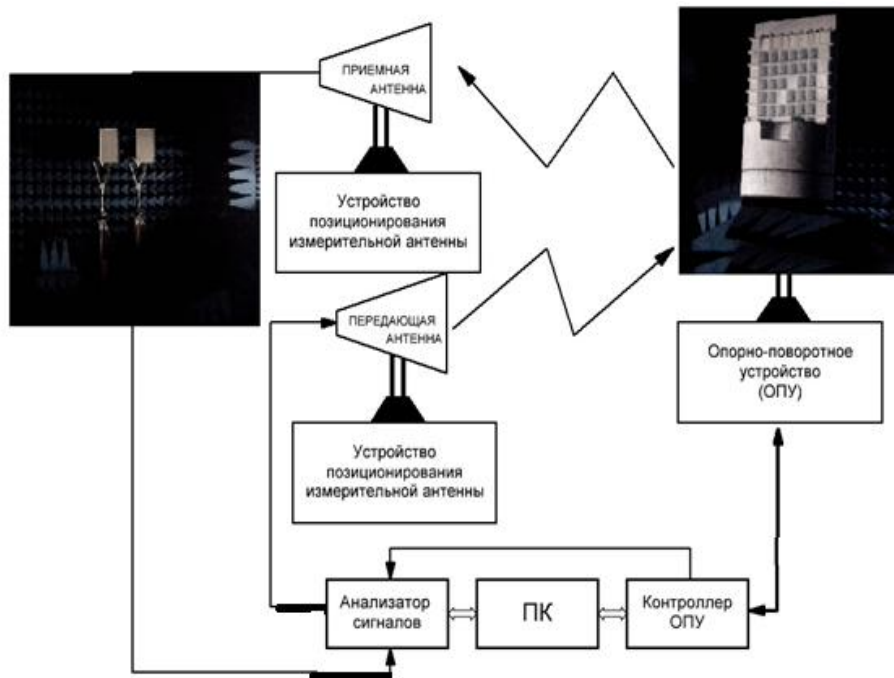


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

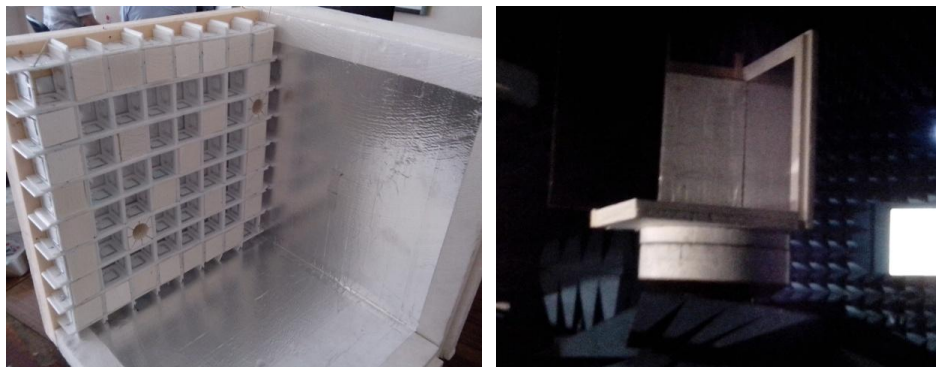


Рис. 4. Угловый отражатель

При повороте углового отражателя на 10° эффект снижения ЭППР в диапазоне 2,5–3 ГГц сохраняется только у комбинированной структуры. Исчезают резонансные эффекты в области частот 4,5–5 ГГц. Выравниваются значения величин ослабления для всех метаструктур в области частот 5–6,5 ГГц.

При повороте углового отражателя на 15° эффект снижения ЭПР на в диапазоне 2,5–3 ГГц у комбинированной структуры также сохраняется, однако уменьшается эффективность материала. В полосе частот 5–6,5 ГГц сужается рабочая полоса для спиральной и рамочной метаструктур, а также наблюдается снижение эффективности работы, тогда как для комбинированной структуры, несмотря на сужение полосы, наблюдается увеличение эффективности работы. Появляется рабочий участок в полосе 6–7 ГГц, для спиральной и модифицированной структур.

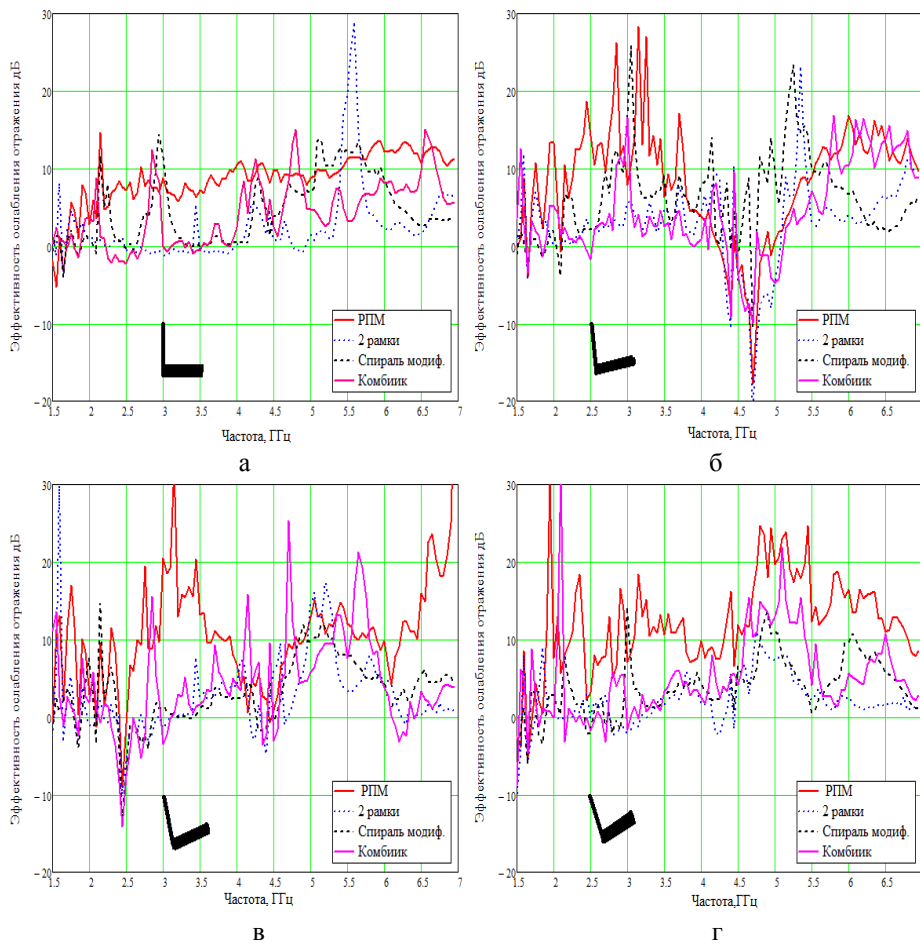


Рис. 5. Разность коэффициентов отражения углового отражателя и углового отражателя, прикрытого одной из исследуемых структур:
 а – нормальное падение волны; б – 5° относительно нормали;
 в – 10° относительно нормали; г – 15° относительно нормали

Как видно из приведенных характеристик исследований, применение комбинированных структур позволяет повысить эффективность снижения ЭПР металлического экрана, за счет совмещения рабочих полос различных типов элементов метаструктур (в данном случае спиральных и рамочных), а также расширить угловые области подавления ЭПР относительно нормали к экрану.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Веселаго В.Г.* Метаматериалы как объект нанотехнологий и их математическое моделирование // XV конференция представителей региональных научно-образовательных сетей "RELARN-2008" // 1-8 июня 2008 года, Нижний Новгород – Пермь.
2. *Казанцев Ю.Н.* Электрофизические основы применения частотно-селективных структур (поверхностей) в радиопоглощающих магнитных композитах. – Номер гранта: 10-08-00018.
3. *Принц В.Я.* Электромагнитная «магия» сверхматериалов" // Наука из первых рук. – 2012. – № 1 (43). – С. 22-25.

4. Слобожанюк А.П., Лалин М.В., Квишарь Ю.С., Белов П.А. Нелинейные метаматериалы на основе спиральных резонаторов // Всероссийская научно-техническая конференция "Микроэлектроника СВЧ". – Санкт-Петербург, 2012. – С. 50-53.
5. Ali, A., Bilottu, F., Nader, E. and Vegni, L. Metamaterial Covers Over a Small Aperture // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – № 54 (6). – P. 1632-1643.
6. Неганов В.А., Осипов О.В. Электродинамика отражающих и волноведущих структур с искусственными киральными элементами // Успехи современной радиоэлектроники. За рубежом радиоэлектроника. – 2005. – № 8. – С. 20.
7. Casse B.D.F., Moser H.O., Jian L.K., Bahou M., Wilhelmi O., Saw B.T. and Gu P.D. Fabrication of 2D and 3D Electromagnetic Metamaterials for the Terahertz Range, Journal of Physics.
8. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 5. – С. 438-457.
9. Мусаев М.М. Экспериментальное исследование частотно-селективных поверхностей на основе резонансных элементов // Сборник трудов Международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" ИРЭМВ-2013. – С. 361-365.
10. Мусаев М.М., Литовкин В.В., Кузнецов М.К. Моделирование характеристик метаматериала в программе FEKO // X Всероссийская научная конференция «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». Сборник материалов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – Т. 1. – С. 48-49.
11. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Мусаев М.М., Литовкин В.В., Кузнецов М.К. Моделирование характеристик метаматериала // Материалы Международной научной конференции «Информационное общество: идеи, технологии, системы». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – Ч. 5. – С. 53-55.
12. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Мусаев М.М. Моделирование характеристик метаматериала в пакете FEKO // Междудеятельственный сборник «Рассеяние электромагнитных волн». – Таганрог, 2010. – Вып. 16.
13. Мусаев М.М. Электродинамическое моделирование характеристик частотно-селективных поверхностей на основе метаматериалов // Сборник трудов конференции «Теоретические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем» (Системотехника 2011). – С. 66-71.
14. Мусаев М.М. Численное и экспериментальное исследование метаматериалов на основе спиральных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 82-86.
15. Кисель Н.Н., Мусаев М.М. Исследование экрана на основе спиральных элементов // Сборник тезисов 17-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – С. 17-18.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.А. Зинченко.

Мусаев Максуд Мурад Оглы – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: Vargallow@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Кисель Наталья Николаевна – e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Musaev Maxud Murad Ogli – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: Vargallow@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.

Kisel' Natalia Nikolayevna – e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.