

16. Воронина, Л. А. Научно-инновационные сети в России: опыт, проблемы, перспективы / Л. А. Воронина, С. В. Ратнер. — М.: ИНФРА-М, 2010. — 254 с.
17. Межорганизационные сетевые взаимодействия как определяющая форма научно-технического и инновационного сотрудничества России и Европейского Союза в Балтийском регионе / О. Н. Большев, К. Ю. Волошенко // Балтийский регион. — 2013. — №4(18). — С. 23–39.
18. Meyer, J.-B., Brown, M. Scientific Diasporas: a New Approach to the Brain Drain [Electronic resource] / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. — Mode of access: <http://www.unesco.org/most/meyer.htm>. — Date of access: 13.04.2016.
19. The Yearbook of International Organizations [Electronic resource] / Union of international associations. — Mode of access: <https://uia.org/yearbook>. — Date of access: 20.10.2017.
20. Цыганков, П. А. Теория международных отношений: Учеб. пособие / П. А. Цыганков. — М.: Гардарики, 2003. — 590 с.
21. Scientific Malaysian. A global network of Malaysian scientists [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.scientificmalaysian.com/about-us/>. — Date of access: 02.03.2018.
22. Международная Ассоциация русскоговорящих ученых [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dumaem-po-ruski.org/1048108910901086108810801103.html>. — Дата доступа: 01.03.2018.
23. Association of Nigerian Physicians in the Americas [Electronic resource]. — Mode of access: <https://anpa.org/benefits/>. — Date of access: 01.03.2018.
24. Korean-American Scientists and Engineers Association [Electronic resource]. — Mode of access: <https://ksea.org/main/about-ksea/>. — Date of access: 01.03.2018.
25. Baltic University Programme [Electronic resource]. — Mode of access: <http://www.balticuniv.uu.se>. — Date of access: 13.02.2018.
26. Science and Engineering Indicators 2012. Chapter 5. Academic Research and Development [Electronic resource] / National Science Foundation. — Mode of access: <https://www.nsf.gov/statistics/seind12/pdf/c05.pdf/>. — Date of access: 10.03.2018.
27. Science and Engineering Indicators 2018. Chapter 5. Academic Research and Development [Electronic resource] / National Science Foundation. — Mode of access: <https://www.nsf.gov/statistics/2018/nsb20181/assets/968/academic-research-and-development.pdf/>. — Date of access: 10.03.2018.
28. Малашенкова, О. Ф. Трансфер технологий в западной экономической науке / О. Ф. Малашенкова, В. В. Каминская // Беларусь и мировые экономические процессы: сб. науч. статей. — Вып. 10. — Минск, 2013. — С. 14–24.
29. Тапскотт, Д. Викиномика. Как массовое сотрудничество изменяет все / Д. Тапскотт, Энтони Д. Уильямс; пер. с англ. П. Миронов при участии Г. Василенко. — СПб.: BestBusinessBooks, 2009. — 387 с.
30. Шевченко, И. В. Глобальные инновационные сети в постиндустриальной экономике: открытость и научное сотрудничество / И. В. Шевченко, О. А. Салмина // Финансы и кредит. — 2011. — №47(479). — С. 10–18.
31. Howe, J. Crowdsourcing: A Definition [Electronic resource] / Crowdsourcing: why the power of the crowd is driving the future of business. — Mode of access: [http://crowdsourcing.typepad.com/cs/2006/06/crowdsourcing\\_a.html](http://crowdsourcing.typepad.com/cs/2006/06/crowdsourcing_a.html). — Date of access: 13.04.2017.
32. Казарина, Н. В. Трансформация международного научно-технического сотрудничества в условиях развития информационно-коммуникационных технологий / Н. В. Казарина // Сборник работ 74-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета, 15–24 мая 2017 г., Минск. В 3 ч. Ч. 2 / БГУ, Гл. управление науки; отв. за выпуск С. Г. Берлинская. — Минск: БГУ, 2017. — С. 48–51.
33. Казарина, Н. В. Развитие сетевых форм международного научно-технического сотрудничества / Н. В. Казарина // Сборник тезисов 74-й научно-практической конференции студентов, магистрантов и аспирантов факультета международных отношений БГУ, 19 апреля 2017 г. / редкол.: В. Г. Шакурский [и др.]. — Минск, 2017. — С. 149–150.

УДК 621.396

## РАДИОМАСКИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ НЕПОГЛОЩАЮЩЕГО ТИПА

### RADIO MASKING COATING OF NONABSORBING TYPE

**И. И. Жебрун,**

инженер-конструктор СКБ-4 НПООО «ОКБ ТСП», г. Минск, Республика Беларусь

**I. Zhebrun**

engineer designer of the SPLLC "OKB TSP", Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 30.08.2018 г.

В статье описана модель и результаты численного исследования отражательных свойств периодической решетки из полосковых элементов, расположенных над проводящим экраном. Достижение маскировки обеспечивается за счет эффекта преобразования поляризации.

The article describes the model and numerical investigation results of the reflective properties of the periodic array of strip elements, located above the conducting screen. The masking achieving is provided by the effect of polarization conversion.

Ключевые слова: электромагнитная волна, радиомаскировка, непоглощающее маскирующее покрытие, кроссовая поляризация.

Keywords: electromagnetic wave, radio masking, nonabsorbing masking coating, cross polarization.

*Введение.*

В настоящее время существует большое количество методов, с помощью которых решаются задачи радиомаскировки объектов различного функционального назначения. К ним можно отнести создание объектов специальной геометрии [1], использование покрытий поглощающего типа [1–3], применение трансформационной оптики [4, 5]. Не менее важными являются задачи обеспечения электромагнитной совместимости, радиоэкологии и защиты информации, которые предполагают применение радиопоглощающих материалов и покрытий.

Воздействие мощных электромагнитных полей может привести к разрушению и перегреву конструкции, или изменению электромагнитных параметров материалов, входящих в покрытие. Покрытия поглощающего типа экранируют фоновое электромагнитное излучение [6], что при создании эффекта «невидимости» является демаскирующим фактором. Одним из возможных путей разрешения существующих проблем является создание технологий маскировки без поглощения электромагнитной энергии, которые в дальнейшем будут раскрыты.

*Выбор объекта исследования.*

В качестве исследуемого объекта выбрана модель непоглощающего покрытия, представляющая собой периодическую структуру, состоящую из экрана и полосковых элементов, расположенных параллельно к его поверхности на определенном расстоянии. В качестве материала для такого покрытия может быть использован идеальный проводник, чем исключается ослабление уровня отраженного сигнала за счет поглощения электромагнитной энергии. Полосковые элементы имеют форму уголков, размеры которых выбираются с учетом рабочего диапазона частот.

*Рассмотрение модели объекта бесконечной структуры.*

Разработка модели покрытия непоглощающего типа базируется на использовании метода конечных интегралов [7]. Рассмотрение и исследование бесконечной структуры обычно сводится к выбору периода решетки, ограниченно-го пространственным волноводом с заданными граничными условиями на его стенках. На рис. 1 представлен участок покрытия в пределах одного периода.

Геометрические размеры элемента структуры в пределах одного периода подбирались на основании следующих соотношений:

$$D_x = D_y < \lambda, \tag{1}$$

где  $D_x, D_y$  — период решетки по координате  $x$  и  $y$  соответственно;  $\lambda$  — длина волны, соответствующая верхней границе заданного частотного диапазона.

Длина полоскового элемента выбиралась из примерного соотношения:

$$L \approx 0,5 \lambda. \tag{2}$$

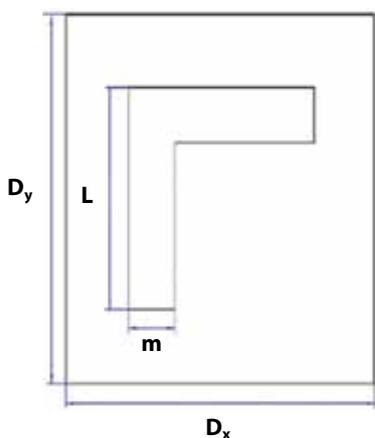
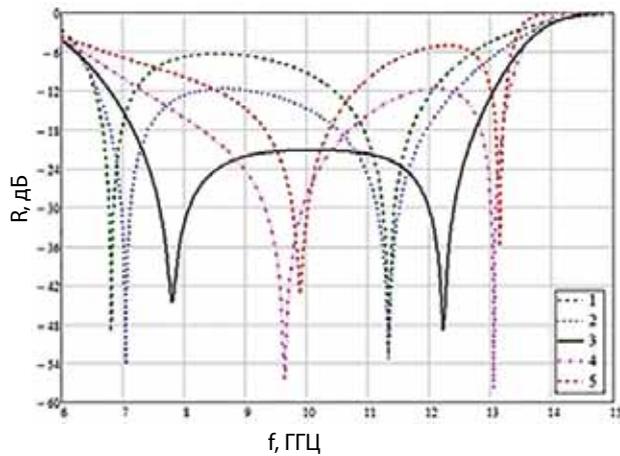
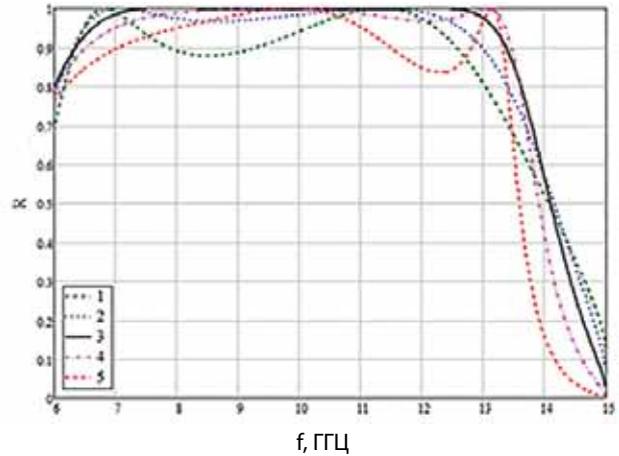


Рис. 1. Геометрия периодической структуры в пределах периода



а) Основная поляризация



б) Кроссовая поляризация

Рис. 2. Коэффициент отражения при высоте: 1 — 5 мм; 2 — 6 мм; 3 — 7 мм; 4 — 8 мм; 5 — 9 мм

Ширина уголка  $t$  и оптимальные значения параметров определялись непосредственно в процессе моделирования, которое проводилось в диапазоне частот от 6 до 15 ГГц. Рассматривался случай нормального падения плоской электромагнитной волны с линейной поляризацией. Для заданного частотного диапазона определены следующие значения параметров:  $D_x = D_y = 20$  мм,  $L = 14$  мм,  $t = 3$  мм. Высота расположения полоскового элемента над поверхностью экрана выступала в качестве переменной величины. Результатом моделирования является частотная зависимость коэффициента отражения для основной и кроссовой поляризаций, которые представлены на рис. 2 в виде частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны для двух ортогональных поляризаций.

Анализируя полученные результаты, наблюдаем на полученной характеристике основной поляризации два ярко выраженных резонанса и значительное ослабление рассеянного поля. В то же время коэффициент отражения на кроссовой поляризации достигает своего максимального значения. Это значит, что наличие уголкового элемента над проводящим экраном приводит к преобразованию поляризации электромагнитной волны в процессе ее взаимодействия со структурой. Из полученных зависимостей также видно, что в заданном частотном диапазоне существует оптимальная высота ( $h = 7$  мм), на которой данное преобразование осуществляется наилучшим образом. Следовательно, оптимальный подбор всех параметров позволяет достичь желаемого эффекта в широком частотном диапазоне с коэффициентом перекрытия до 2.

Рассмотрено поведение частотной зависимости коэффициента отражения падающей волны на основной поляризации в зависимости от ширины уголка, для полученных ранее геометрических размеров. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Анализ представленных частотных зависимостей (см. рис. 3) показывает, что ширина металлического элемента значительно влияет на поведение резонансных кривых. Так, при ее уменьшении относительно оптимального значения (равного 3 мм), происходит сдвиг наблюдаемых резонансов в сторону низких частот. В то же время, при ее увеличении происходит исчезновение наблюдаемых провалов.

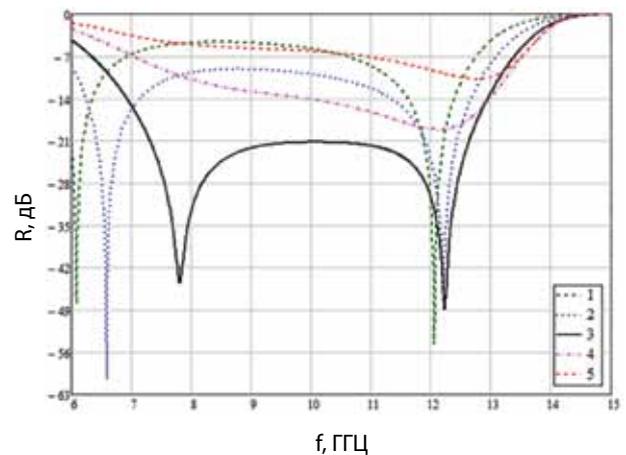


Рис. 3. Основная поляризация при ширине уголка: 1 — 1 мм; 2 — 2 мм; 3 — 3 мм; 4 — 4 мм; 5 — 5 мм

*Рассмотрение модели объекта конечной структуры.*

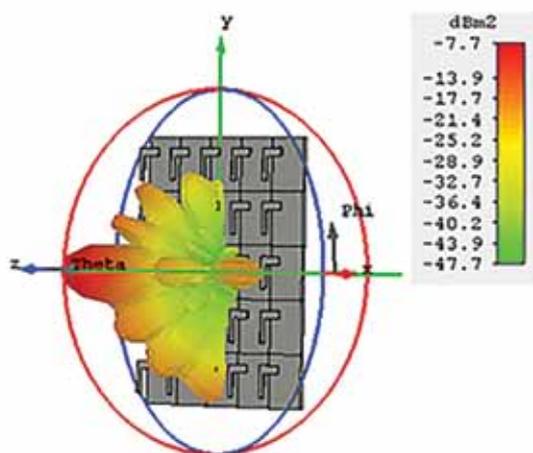
На основании метода интегральных уравнений [7] было исследовано влияние размеров структуры на маскирующие характеристики покрытия. Для исследования были выбраны плоские структуры с размерами 5×5, 10×10, 15×15, 20×20 элементарных ячеек (см. рис. 1). Конструктивные параметры покрытия в пределах ячейки остаются прежними. Вычисления проводились на частоте 10 ГГц. Рассматривались как вертикальная, так и горизонтальная компоненты рассеянного поля. Также для сравнения было рассмотрено поведение электромагнитной волны при отражении от идеально проводящего экрана идентичного размера. Результаты моделирования были представлены в виде диаграмм рассеяния (ДР) поля в дальней зоне (ДЗ).

Результаты моделирования представлены (рис. 4) в виде диаграмм рассеяния (ДР) двух компонент поля в дальней зоне (ДЗ) для исследуемой структуры размерами 5×5 и экрана.

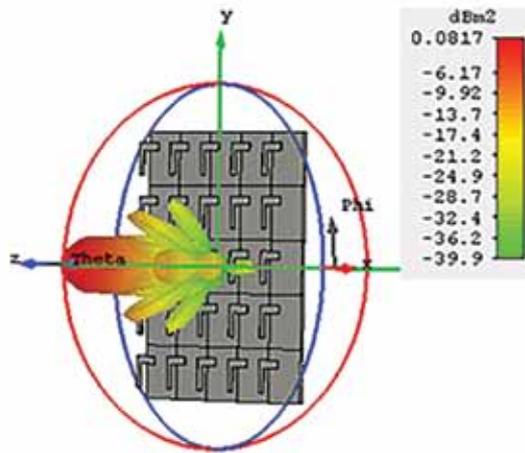
На диаграммах (см. рис. 4) наблюдается, что даже на структуре с малыми размерами 5×5 проявляется преобладание крсовой компоненты над основной. В то же время в результате взаимодействия электромагнитной волны с проводящим экраном, наблюдается сохранение основной поляризации.

*Рассмотрение модели объекта аperiodической структуры.*

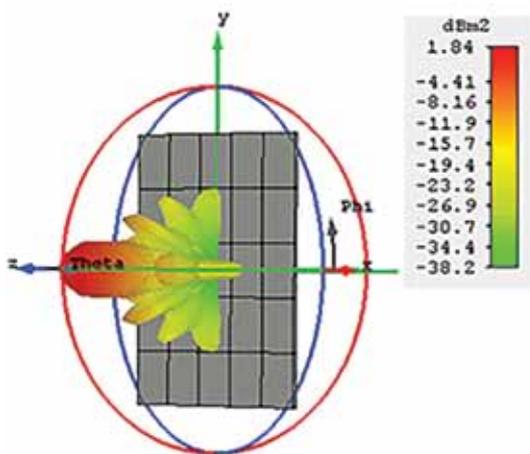
Рассмотрен случай, когда периодичность структуры нарушена. За основу взята поверхность покрытия размерами 10×10 элементарных ячеек. В пределах каждой ячейки полосковый элемент



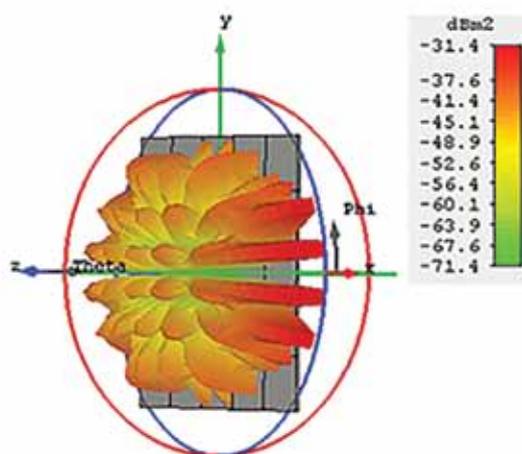
а) Основная поляризация (периодическая структура)



б) Крсовая поляризация (периодическая структура)



в) Основная поляризация (проводящий экран)



г) Крсовая поляризация (проводящий экран)

Рис. 4. Диаграмма рассеяния поля в дальней зоне

случайным образом сдвигался на некоторое расстояние вдоль осей  $x$  и  $y$  в пределах элементарной ячейки. Вычисления проводились на частоте 10 ГГц. Результаты моделирования для основной и кроссовой компонент поля представлены на рис. 5.

Анализ результатов моделирования (см. рис. 5) диаграмм рассеяния поля показывает, что при нарушении периодичности за счет сдвига угловых элементов в пределах периода структуры эффект преобразования поляризации сохраняется и кроссовая компонента остается преобладающей над основной.

Разработанные структуры могут найти применение при обеспечении маскировки объектов в условиях воздействия мощных электромагнитных импульсов, так как не подвергаются разрушению за счет сильного нагрева. Покрытия такого рода могут использоваться в качестве широкополосных устройств для поворота плоскости поляризации отраженного поля. С их помощью можно обеспечить маскировку без экранирования электромагнитного фона. Такого рода структуры имеют малый вес по сравнению, например, с поглощающими покрытиями и небольшую стоимость, так как состоят из проводящих пластинок, что является неоспоримым преимуществом.

**Заключение.**

В результате вычислительного эксперимента было исследовано радиомаскирующие покрытие непоглощающего типа в виде периодической решетки из полосковых элементов, расположен-

ных над проводящим экраном. Подтверждено, что элементы в форме уголков обеспечивают преобразование поляризации рассеянного от такого покрытия поля в достаточно широком частотном диапазоне. Данный эффект проявляется на структурах малых геометрических размеров, а также и при нарушении периодичности.

**Литература:**

1. Цветнов, В. В. Радиоэлектронная борьба: радиомаскировка и помехозащита / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. — М.: МАИ, 1999. — 239 с.
2. Никольский, Б. А. Методы и средства радиоэлектронной защиты летательных аппаратов: учеб. пособие / Б. А. Никольский; СГАУ им. академика С. П. Королева. — Самара, 2007. — 79 с.
3. Маковецкий, П. В. Отражение радиолокационных сигналов: лекции / П. В. Маковецкий, В. Г. Васильев; М-во высш. и средн. спец. образования, ЛИАП. — Ленинград, 1975. — 50 с.
4. Щелкова, А. В. Экспериментальные реализации маскирующих покрытий/ А. В. Щелкова и др. // Успехи физических наук. — 2015. — Т. 185. — № 2. — С. 181–206.
5. Кильдишев, А. В. Трансформационная оптика и метаматериалы / А. В. Кильдишев, В. М. Шалаев // Успехи физических наук. — 2001. — Т. 181. — № 1. — С. 59–70.
6. Банный, В. А. Современные материалы и способы защиты биологических объектов от воздействия электромагнитных полей и излучений / В. А. Банный и др. // Проблемы здоровья и экологии. — 2016. — С. 4–10.
7. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST MicrowaveStudio / А. А. Курушин, А. Н. Платиков. — М.: МЭИ, 2011. — 155 с.

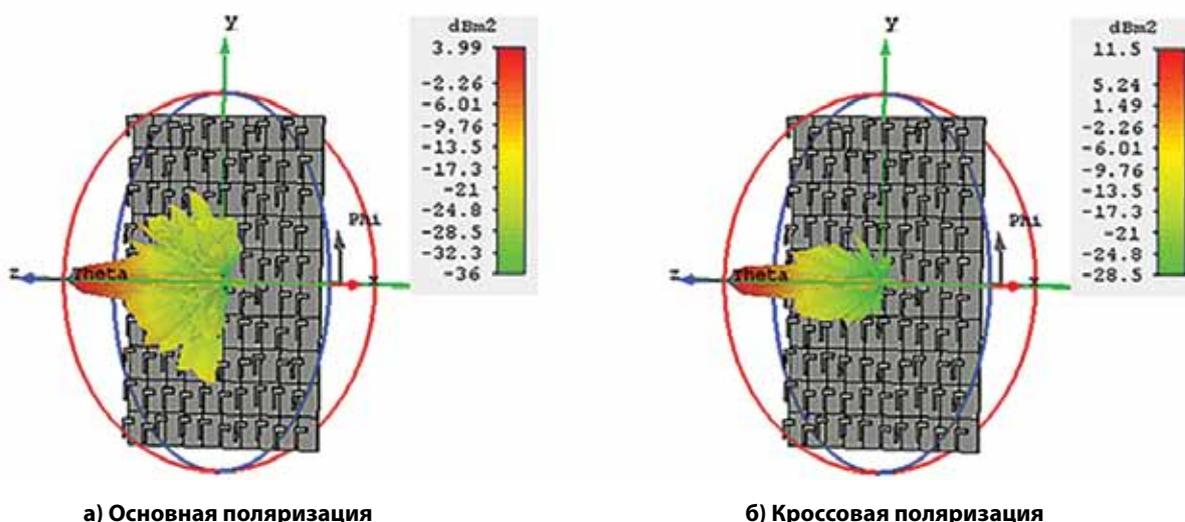


Рис. 5. Диаграмма рассеяния поля в дальней зоне для аperiodической структуры