

УДК 621.396

**А.О. Касьянов, К.В. Суматохин****МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ  
ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ  
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В ПЕЧАТНОМ ИСПОЛНЕНИИ**

*Применение интеллектуальной обшивки в перспективных летательных аппаратах (ЛА), объединяющей функции таких подсистем, как антенная, сенсорная и управляемого рассеяния, позволяет существенно снизить энергозатраты авионики ЛА, а введение в ее состав ректенн решает проблему беспроводного энергоснабжения ЛА. Печатные антенны являются высокотехнологичной конструктивной реализацией ректенн. При этом, как правило, ректенна приемной станции ЛА представляет собой отражательную решетку (ОАР). В статье представлены результаты моделирования реконфигурируемых (управляемых) частотно-избирательных поверхностей и печатных ОАР как СВЧ-компонентов интеллектуальной обшивки ЛА.*

*Реконфигурируемая печатная решетка; частотно-избирательная поверхность; антенный отражатель.*

**А.О. Kasyanov, С.V. Sumatokhin****FULL-WAVE SIMULATION OF RECONFIGURABLE FREQUENCY  
SELECTIVE SURFACES AND MICROSTRIP REFLECTARRAYS**

*The solution of the problem of a full-wave simulation of reconfigurable rectennas based on printed lattices has been obtained. Microstrip reflectarrays (RAA) and frequency selective surfaces (FSS) are considered. The possible FSS/RAA application area is discussed and it's shown these EM structures are the very attractive type of array for smart covers components designing at microwaves. Computer simulation is made using mathematical model based on periodical structures theory and integral equation solution. Some numerical and experimental results presented prove the possibility of FSS/RAA application as smart covers microwave module.*

*Reconfigurable printed lattice; frequency selective surface; microstrip multielement reflective type antenna array.*

Исследуем возможность применения микрополосковых дифракционных решеток как микроволновых модулей подсистемы управляемого рассеяния интеллектуального покрытия. При этом в качестве управляющих элементов выступают поверхность-ориентированные переключаемые СВЧ-диоды.

Реконфигурируемые частотно-избирательные поверхности (ЧИП) [1] в первую очередь применяются для создания многочастотных зеркальных антенн, в качестве основы для построения радиопрозрачных обтекателей антенных систем [2], для создания антенн, обладающих пониженной радиолокационной заметностью [3], для решения задач электромагнитной совместимости, для обеспечения совместной работы радиоэлектронных средств на разных частотах, а также при создании ректенн [4]. Конструктивно ЧИП чаще всего представляет собой плоскую двумерную периодическую решетку из проводов или печатных полосковых элементов либо перфорированный металлический экран. Наиболее технологичными являются ЧИП в печатном исполнении. На рис. 1 и 2 представлены результаты численного моделирования таких частотно-избирательных поверхностей.

На рис. 1 представлены результаты численного исследования частотных свойств бесконечно тонкого плоского экрана, перфорированного двоякопериодической решеткой крестообразных щелей, имеющих форму иерусалимского креста (показаны на врезках а),

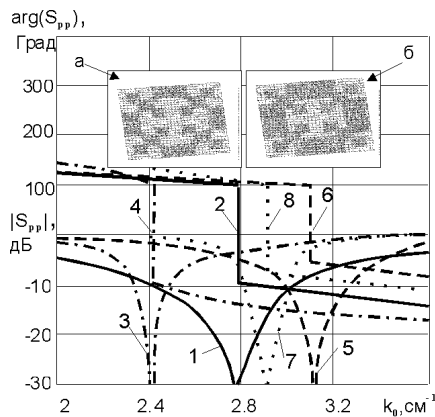


Рис. 1. Частотные характеристики 1-го варианта реконфигурируемой ЧИП

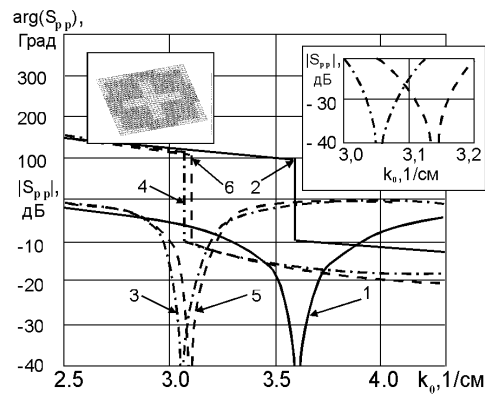


Рис. 2. ЧХ экрана с крестообразными щелями (2-го варианта реконфигурируемой ЧИП)

б – известно [1], что такой экран относится к категории ЧИП, у которых наблюдаются две резонансные частоты. Поскольку второй (более высокой) резонансной частоте свойственна существенная зависимость от угла падения, то показанный на рис. 1 частотный диапазон, выбран так, чтобы в него попадала только низшая резонансная частота, значение которой малочувствительно к углу падения. Исследуемая ЧИП имеет размеры единичной ячейки  $15 \times 15$  мм. Кривые, приведенные на рис. 1, представляют собой зависимости амплитуд и фаз элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР)  $S_{pp}$  от постоянной распространения свободного пространства  $k_0$  ( $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны) для 4-х различных структур. Кривые 1–4 соответствуют конфигурации щелей, показанной на врезке а, кривые 5–8 – на врезке б. При этом результаты расчетов для прямоугольной сетки размещения элементов (в этом случае центральные кресты в единичных ячейках, показанных на врезках, отсутствуют) представлены парами кривых 3 и 4, а также 7 и 8 (здесь и далее первая цифра в паре – модуль, вторая – фаза  $S_{pp}$ ). Результаты расчетов для решеток с треугольной сеткой расположения элементов представлены парами кривых 1 и 2, а также 5 и 6. Для решеток этого типа, как следует из графиков, характерным является более высокочастотный резонанс полного прохождения, чем для ЧИП с прямоугольной сеткой. Это объясняется способом задания исходных данных в настоящем примере, связанным с уменьшением расстояний между щелями при неизменных размерах единичной ячейки, имеющей форму прямоугольника. Если при определении относительной ширины полосы прозрачности принять за допустимый уровень снижения  $S_{pp}$  до  $-20$  дБ, то наиболее широкую полосу прозрачности 7,1 % имеет ЧИП первой конфигурации с треугольной сеткой размещения излучателей. Наименьшее значение ширины 2,1 % обеспечивает ЧИП, построенная из тех же элементов, но расположенных в узлах прямоугольной сетки.

Известно [5], что при создании интеллектуальных покрытий в качестве элементов антенных подсистем и подсистем управляемого рассеяния широко применяются управляемые ("активные") ЧИП. В конструкцию такой ЧИП включаются управляемые полупроводниковые диоды. Рассмотрим ЧИП, фрагмент которой

показан на левой врезке рис. 2. Крестообразные щели располагаются в узлах треугольной сетки. Планарные диоды введены в конструкции «центральных» (на показанном фрагменте) крестообразных апертур. Если поочередно включать и выключать диоды, то можно электронным образом управлять размещением элементов решеток: отверстия располагаются либо в узлах треугольной (кривые 1 и 2), либо в узлах прямоугольной сетки (кривые 3 и 4). Это позволяет создать управляемую ЧИП. С целью проверки этого предположения проведен численный эксперимент для случая, когда диоды, включенные в «центральную» апертуру, находятся в открытом состоянии. Этот режим моделировался введением в конструкции "центрального креста" импедансных участков с нулевым поверхностным сопротивлением. Результаты представлены в виде кривых 5 и 6. Здесь, как и на рис. 1, первая цифра в паре – модуль, вторая – фаза  $S_{pp}$ . Как видно из графиков, отличие этого случая от полностью «металлизированной» центральной апертуры весьма незначительно. Оно проявляется лишь в окрестности резонанса полного прохождения и показано на правой врезке рис. 2. Рассмотренные выше конструкции ЧИП в виде перфорированных экранов могут применяться для изготовления обтекателей антенн [2] с повышенной механической прочностью.

Наряду с перфорированными экранами в качестве ЧИП можно применять и решетки полосковых элементов. В качестве примера построения на основе таких решеток *реконфигурируемых ЧИП* в [6] рассмотрены решетки со свободно установленными печатными элементами в виде квадратных рамок. В случае, когда в местах разрыва печатных рамок размещаются управляющие СВЧ-элементы переключательного типа, например, поверхностно-ориентированные  $p-i-n$ -диоды, то на резонансной частоте такая *управляемая ЧИП* под воздействием модулирующего низкочастотного сигнала может переводиться из электродинамического состояния радиопрозрачности в полностью непрозрачное для возбуждающих ее электромагнитных волн (ЭМВ) состояние.

**Реконфигурируемые отражательные антенные решетки (ОАР)** [7] могут быть получены введением в состав каждого из микрополосковых переизлучателей ОАР управляющих СВЧ-элементов. Сначала остановимся на результатах экспериментального исследования дополнительных возможностей по управлению фазой поля, отраженного решеткой микрополосковых элементов (МПЭ), содержащих проводящие стержни, закорачивающие полосковый элемент на экран. Экспериментально покажем, что с помощью таких штырей можно регулировать значение фазы отраженной от решетки ЭМ волны.

Известно несколько вариантов конструкций, в которых короткозамыкающие штыри интегрированы с фазовращателями полосковых излучателей [8, 9]. При этом конструкция дискового полоскового элемента, по периферии которого расположены коммутируемые  $p-i-n$ -диоды, по-видимому, является одной из наиболее удачных. Приведем результаты экспериментального исследования такого дискового излучателя. При изготовлении макета в качестве материала подложки был использован стеклотекстолит с относительной диэлектрической проницаемостью

$\epsilon_r = 4,8$  и толщиной 1 мм. Диаметр диска выбран близким к резонансному. На рис. 3 приведены зависимости фазовой задержки от угла расположения управляемого короткозамыкателя ( $p-i-n$ -диода). При проведении измерений использовался единственный короткозамыкатель, а изменялся угол поворота излучателя по отношению к вектору напряженности электрического поля.

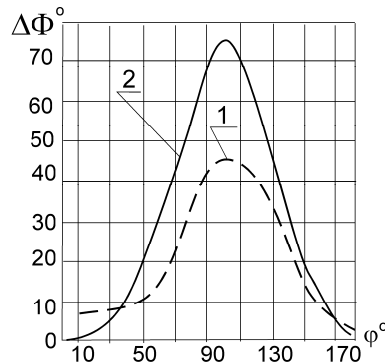


Рис. 3. Экспериментальные зависимости фазовых задержек от угла поворота дискового печатного элемента: 1 – с одним короткозамыкателем; 2 – с двумя короткозамыкателями

На этом же рисунке показаны аналогичные результаты для излучателя с двумя короткозамыкателями, расположенными друг относительно друга под углом  $90^\circ$ . Видим, что применение двух короткозамыкающих штырей улучшает линейность фазовой характеристики и несколько расширяет диапазон регулировок. Однако, общим недостатком двух конструкций излучателей являются ограниченные пределы регулирования фазовой задержки при линейной поляризации падающего поля.

**Реконфигурируемые твист-рефлекторы на основе печатных ОАР.** Введение в состав элементов твист-рефлектора управляемых нагрузок позволяет получить качественно новый тип устройств, регулирующих поляризационные характеристики отраженного поля. Исследуем возможность создания таких отражателей на примере структуры, которую можно назвать поляризационным модулятором и осуществлять с его помощью формирование сигналов с дискретной поляризационной модуляцией (манипуляцией) [10].

Известно [6], что решетки печатных вибраторов имеют в одноволновой области периодичности, как минимум, один резонанс полного отражения. Рассмотрим решетку с топологией печатных элементов, приведенной на врезке (рис. 4). Реконфигурируемая вибраторная ОАР характеризуется такими геометрическими размерами:  $t_x = 10$  мм,  $t_y = 10$  мм – шаги решетки;  $a = b = 7$  мм – длины проекций сторон печатных вибраторов. Когда каждый из  $p-i-n$ -диодов, входящих в состав отражательной решетки, открыт, в соответствие ему ставится металлизированный участок поверхности, в закрытом состоянии (сопротивление диода велико) в соответствие ему ставится неметаллизированный участок. Такой подход экспериментально обоснован в [11, 12]. На рис. 4 приведены ЧХ модулей элементов ПМР такого модулятора в случае, когда реконфигурируемая ОАР возбуждается нормально падающей плоской волной параллельной поляризации. При этом плоскость падения является диагональной плоскостью квадратных микрополосковых элементов и проходит через те их вершины, к которым подключены  $p-i-n$ -диоды. Если диод открыт, возбуждающая решетку ЭМ волна линейной поляризации почти полностью преобразуется в волну ортогональной поляризации в диапазоне частот примерно от 14 ГГц до 22 ГГц, т.е. относительная ширина полосы частот твист-эффекта составляет  $\delta = \Delta f / f_{\text{средн.}} \approx 54,5$  %. Если же диод закрыт, преобразования поляризации не происходит. При этом длины печатных вибраторов уменьшаются вдвое и резонансная частота реконфигурированной ОАР смещается в многоволновую область периодичности.

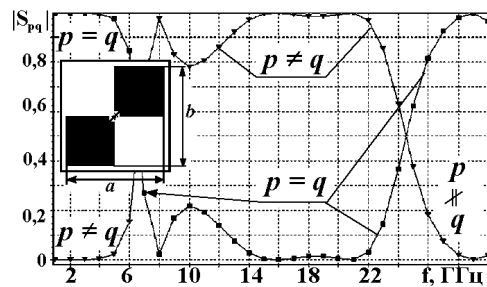


Рис. 4. ЧХ модулей элементов ПМР в полярizaционном базисе, повернутом на  $45^\circ$  относительно собственного, т.е.  $p = 1, q = 1, 2$

Таким образом, с помощью описанной ОАР можно реализовать бинарную полярizaционную модуляцию отраженной от нее волны управляющим напряжением на диодах, входящих в состав микрополосковой решетки отражательного типа. При этом заметим, что в отличие от отражательной решетки реконфигурируемых крестообразных апертур, эта печатная решетка позволяет реализовать полярizaционную модуляцию в гораздо более широкой полосе частот, так как, по существу представляет собой самодополнительную электродинамическую структуру. Приведенные результаты исследований позволяют выбрать конструкцию элементов и определить размеры, обеспечивающие требуемые частотные зависимости характеристик рассеяния, и позволяющие осуществить твист-эффект.

В заключение рассмотрим пример построения на основе ОАР полярizaционного манипулятора, трансформирующего, когда  $p-i-n$ -диоды открыты, полярizaцию поля возбуждающей его линейно поляризованной плоской волны в собственном полярizaционном базисе решетки. Топология единичной ячейки микрополосково-щелевой отражательной решетки представлена на врезках рис. 5. Видим, что решетка крестообразных щелей в проводящем плоском экране содержит  $p-i-n$ -диоды, место включения которых указано в виде металлизированных перемычек в каждом из щелевых переизлучателей такой ОАР в случае, когда диоды находятся в открытом состоянии. Параметры реконфигурируемой решетки:  $d_1 = d_2 = 10$  мм – шаги решетки;  $L_1 = L_2 = 9,2$  мм – длины плеч крестообразных магнитных вибраторов;  $W_1 = W_2 = 1,2$  мм – ширины плеч вибраторов. Толщина подложки, выполненной из сотового материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 1,01$ , равна  $h = 5,5$  мм. Решетка возбуждается нормально падающей локально плоской электромагнитной волной линейной полярizaции.

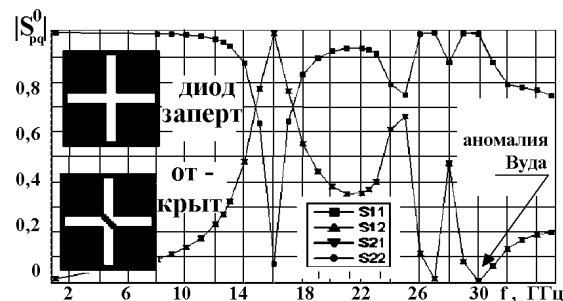


Рис. 5. ЧХ модулей элементов ПМР в собственном полярizaционном базисе микрополосково-щелевой в случае открытых  $p-i-n$ -диодов

Как видно из частотных характеристик (ЧХ) модулей элементов ПМР решетки, определенных в ее собственном поляризованном базисе, орты  $\mathbf{i}_1$  и  $\mathbf{i}_2$  которого ориентированы вдоль плеч крестообразных щелевых вибраторов, в том случае, когда  $p$ - $i$ - $n$ -диоды открыты, в одноволновой области периодичности такая *реконфигурируемая* микрополосковая ОАР на частотах  $f_1 \approx 16$  ГГц,  $f_2 \approx 27$  ГГц выполняет функции твист-рефлектора. Причем как на параллельной, так и перпендикулярной поляризации. Когда диоды, входящие в состав этой ОАР, находятся в запертом состоянии, преобразования поляризации отраженного поля не происходит, т.е. она функционирует просто как плоский рефлектор.

Как показали результаты математического моделирования и экспериментальных исследований «активных» частотно-избирательных решетчатых и щелевых элементов, а также управляемых микрополосковых ОАР, полученные методом волноводного моделирования, подключение  $p$ - $i$ - $n$ -диодов к их планарным переизлучателям позволяет эффективно управлять их характеристиками рассеяния таких электродинамических структур в полосе частот. Таким образом, рассмотренные выше топологии элементов решетчатых структур могут быть рекомендованы при создании микроволновых модулей подсистемы управляемого рассеяния *интеллектуального покрытия*.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бей Н.А., Соколов П.В. Частотно-селективные поверхности для многочастотных зеркальных антенн // Радиотехника. – 1996. – № 2. – С. 30-32.
2. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Численное исследование многофункциональных обтекателей антенн судовых РЛС // В Материалах 3-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» – (ПТСПИ'99). – Владимир, 1999. – С. 160-166.
3. Михайлов Г.Д., Кирьянов О.Е. Структура для снижения эффективной поверхности рассеяния антенн // Антенны. – М.: ИПРЖР, 1997. – Вып. 2 (39). – С. 9-13.
4. McSpadden J.O., Yoo T., Chang K. Theoretical and Experimental Investigation of a Rectenna Element for MW Power Transmission // IEEE Microwave Theory and Techniques. – 1992. – Vol. 40, № 12. – P. 2359-2366.
5. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Интеллектуальные радиоэлектронные покрытия. Современное состояние и проблемы. Обзор // НТИТ журнал «Антенны». – 2001. – № 4 (50). – С. 4-11.
6. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Результаты численного моделирования микрополосково-штыревой отражательной антенной решетки // Антенны. – 2003. – Вып. 6 (73). – С. 4-9.
7. Обуховец В.А., Касьянов А.О. Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
8. Воскресенский Д.И., Филиппов В.С. Печатные излучатели // Антенны. – М.: Радио и связь, 1985. – Вып. 32. – С. 4-16.
9. Zhuang Y., Litva J., Wu C., K.-L. Wu. Modeling studies of microstrip reflectarrays // IEE Proc. Microw. Antennas Propag. – February, 1995. – Vol. 142, № 1. – P. 78-80.
10. Fast Switching Polarization Divers Radar Antenna System: Пат.5337059 США, МКИ G-01 S13/00/Gross J.H., United Techn.Corp. – М. 49096; заявл. 16.04.93; Опубл. 9.08.94; НКИ 342/188.
11. Philips B., Parker E.A., Langley R.J. An active FSS in an experimental horn antenna switchable between two beamwidths. Electron. Lett. – 1995. – Vol. 31. – P. 1-2.
12. Chang T.K., Langley R. J., Parker E.A., Active frequency-selective surfaces // IEE Proceedings of Microwave Antennas and Propagation. – 1996. – Vol. 143, № 1. – P. 62-66.

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

**Касьянов Александр Олегович** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: kasao@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634388844; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор.

**Суматохин Константин Витальевич** – e-mail: sum\_k\_v@mail.ru; тел.: +79198711194; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

**Kasyanov Alexandr Olegovich** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: kasao@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634388844; the department of antennas and radio transmitters; professor.

**Sumatokhin Constantin Vital'evich** – e-mail: sum\_k\_v@mail.ru; phone: +79198711194; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.

УДК 62-799

**А.М. Пашаев, Р.Н. Набиев, Г.И. Гараев**

### **СХЕМА ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОВРЕМЕННОГО ОТКРЫВАНИЯ ДВУХ ИЛИ БОЛЕЕ СИМИСТРОВ**

*Рассматривается один из вариантов решения вопроса предотвращения одновременного включения двух или более симистров, где в качестве датчика напряжения используется сам симистор, а в качестве оптического трансформатора напряжения применяется оптрон.*

*Разработана схема защиты от одновременного открывания двух или более симистров, имеющая определенные преимущества, заключающиеся в том, что уменьшается вероятность возникновения аварийной ситуации, а управляющий сигнал снимается только после аварии. Применение разработанной схемы наиболее эффективно, когда в схеме кроме симисторов используется силовой быстродействующий электронный ключ, который выключает всю схему.*

*Симистор; электронный ключ; быстродействующий; аварийной ситуации; электрическая схема.*

**A.M. Pashayev, R.N. Nabiyev, Q.I. Qarayev**

### **THE SCHEME OF PROTECTION AGAINST SIMULTANEOUS OPENING OF TWO OR MORE TRIACS**

*In given article one of variants of the solution of a question of prevention of simultaneous insert of two or more triacs where as the voltage data unit it is used itself triac is considered, and as the optical transformer of a voltage the optron is applied.*

*The circuit design of protection against simultaneous opening of two or more triacs, having the certain advantages, consisting that the probability of occurrence of an emergency decreases is developed, and the control signal take off only after failure. Application of the developed circuit design most effectively when in the plan except triacs the power high-speed electronic key which un gears all circuit design is used.*

*Triac, an electronic key; high-speed; an emergency; a circuitry.*

В электронных стабилизаторах, работающих по принципу ступенчатого регулирования для подключения в сеть соответствующую обмотку автотрансформатора, используют симисторные ключи. Для включения выбранного следующего симистора необходимо однозначно убедиться, что все симисторы закрыты.