

## Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 621.396.679.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-129-139

**А.О. Касьянов**

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПЕЧАТНОГО ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНОГО АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ**

*Статья посвящена анализу результатов численного исследования характеристик рассеяния печатного частотно-избирательного антенного обтекателя на основе электродинамического моделирования частотно-избирательных поверхностей с диэлектрическими укрытиями. Электродинамические задачи решены методом интегральных уравнения (ИУ). Алгебраизация ИУ задачи выполнена методом моментов. Получены численные результаты электродинамического моделирования ЧИП с диэлектрическими укрытиями, которые могут быть использованы для выбора наиболее рационального варианта геометрии ЧИП при разработке многофункциональных обтекателей в антенных системах СВЧ-диапазона. На основе полученных численных данных рассматриваются возможности применения двух вариантов плоских дифракционных решеток в качестве пространственных фильтров в составе антенных обтекателей.*

*Частотно-избирательные поверхности; многофункциональные антенные обтекатели; метод интегральных уравнений; метод моментов; многослойное магнитодиэлектрическое укрытие; поляризационная матрица рассеяния.*

**A.O. Kasyanov**

### **MATHEMATICAL SIMULATION AND CALCULATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS IN FREQUENCY SELECTIVE PRINTED ANTENNA RADOME**

*Mathematical model of multilayered printed frequency selective surfaces with dielectric covers is presented in this paper. The model is built on the suggestion of array infinity and perfect conductivity of microstrip elements. Such printed structures can be used as frequency selective surface and as covers with controllable characteristics (for example tunable filters, adaptive radar cover, electronically switched polarizers). Full-wave analysis is executed by the integral equation method. The numerical solution of an integral equation has been obtained by Galerkin's method. Unknown distribution of surface magnetic currents has been approximated by roof-top basic functions. The generalized scattering matrix method was used for simulation of multilayered printed frequency selective surface. The paper presents the compound algorithm which combines the integral equation method with the method of generalized scattering matrix. A lot of numerical examples are presented proving the algorithm effectiveness. By means of this model there were synthesized multilayer frequency selective surface as periodic arrays of the printed elements, which have arbitrary shape of reradiators. It is known, that the printed elements of special shape ensure, as rejecting and as transacting of electromagnetic waves in the given frequencies, and have neglected angular sensitivity. The results of constructive synthesis of printed frequency selective surfaces as rejecting or transmitting filters, which have neglected angular sensitivity, are represented in paper. Such an algorithm is rather flexible and multiple repeats the basic problem solution. It makes the procedure of computer code preparing much more effective and do not require to change the problem decision itself.*

*Frequency selective surfaces; multifunctional antenna's radomes; integral equation method; moment method; multilayer magnetodielectric covers; radar scattering matrix.*

**1. Введение.** В настоящее время проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) различных радиоэлектронных средств (РЭС) становится все более острой. Это вызвано стремительным ростом числа одновременно используемых радиосистем, работающих в смежных частотных диапазонах, секторах пространства или на согласованных поляризациях. Во многих случаях для решения проблемы ЭМС в СВЧ-трактах РЭС вводят дополнительные частотные и поляризационные фильтры. Введение дополнительных селективирующих элементов приводит к усложнению тракта и зачастую к значительному его удорожанию из-за снижения технологичности изготовления. В то же время менее дорогостоящим и весьма эффективным способом обеспечения ЭМС близкорасположенных РЭС является использование частотно и поляризационно-селективных обтекателей антенных систем этих радиоэлектронных средств [1, 2]. Вопросы разработки поляризационно-селективных антенных обтекателей ранее рассмотрены автором на примере антенн судовых радионавигационных станций [3–9].

В настоящей статье рассмотрим результаты численного исследования характеристик рассеяния плоских частотно-избирательных антенных обтекателей в виде металлодиэлектрических дифракционных решеток, позволяющие решить актуальную задачу разработки наиболее технологичных антенных обтекателей для развязки близкорасположенных антенн, работающих в смежных частотных диапазонах.

Целью данной работы является разработка математической модели частотно-избирательного антенного обтекателя в виде армированной диэлектриком периодической решетки металлических пластин или отверстий в перфорированном экране, анализ полученных численных результатов и исследование свойств частотно-избирательных антенных обтекателей, выполненных на основе плоских металлодиэлектрических дифракционных решеток, для определения возможности их использования в составе перспективных радиосистем.

Для достижения поставленной цели решены задачи:

- ♦ выполнено электродинамическое моделирование процесса рассеяния волн проходными частотно-избирательными поверхностями на основе металлодиэлектрических структур,
- ♦ определены параметры плоских металлодиэлектрических дифракционных решеток перспективных для применения в качестве антенных обтекателей современных радиосистем.

**2. Постановка задачи.** Известно [10, 11], что применяемые на СВЧ частотно-избирательные поверхности (ЧИП) в большинстве случаев содержат частотно-избирательную решетку (ЧИР) из металлических пластин или апертур в проводящем перфорированном экране, заключенную в диэлектрическую оболочку, предохраняющую ее от неблагоприятного воздействия окружающей среды. Кроме того, как правило, ЧИР представляет собой многоэлементную решетку, имеющую большие электрические размеры. В такой решетке основная масса элементов центральной области находится в почти одинаковых условиях и не чувствует влияния краёв, и наиболее важные особенности её поведения могут быть достаточно точно описаны поведением элементов ЧИР, находящихся в составе бесконечной решетки. Таким образом, для анализа многослойной ЧИР больших электрических размеров можно применить математическую модель бесконечной решетки [12, 13].

Рассмотрим следующую граничную задачу. Пусть частотно-избирательная структура представлена в виде двух магнитодиэлектрических слоёв, на трёх границах раздела которых введены планарные решетки печатных элементов. Последние расположены в узлах двоякопериодической бесконечно протяженной сетки с прямоугольной формой ячейки (рис. 1), где  $d_1$  и  $d_2$  – периоды решетки соответственно вдоль осей  $x$  и  $y$ .

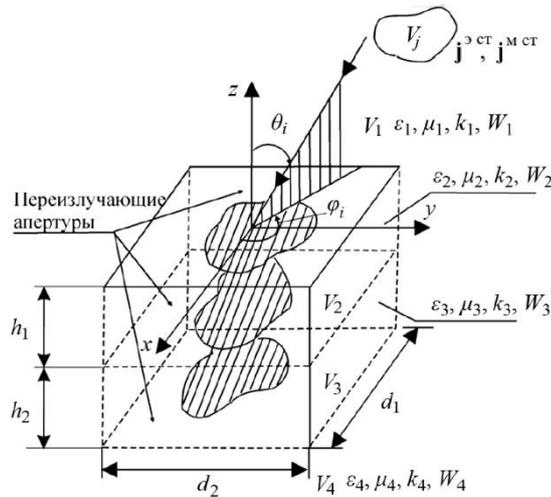


Рис. 1. Геометрия задачи

Печатные элементы решеток ЧИП могут иметь произвольную форму, но при этом предполагаются идеально проводящими и бесконечно тонкими, как показано на рисунке 1. Магнитодиэлектрические слои предполагаются однородными и изотропными. Их толщины обозначены как  $h_1$  и  $h_2$ . Пусть элементы описанной выше плоской ЧИР возбуждаются плоской электромагнитной волной произвольной поляризации. Рассматривается случай наклонного падения волны на такую электродинамическую структуру. Возбуждающие источники  $\mathbf{j}^{\text{ст}}$ ,  $\mathbf{j}^{\text{м ст}}$  находятся в объёме  $V_j$ , занимающем часть объёма  $V_1$  (рис. 1). Объём  $V_1$  занимает всё верхнее полупространство  $z > 0$ . Аналогично объём  $V_4$  занимает всё нижнее полупространство  $z < -(h_1 + h_2)$ . Для объёмов  $V_2 - z \in [-h_1, 0]$  и  $V_3 - z \in [-(h_1 + h_2), -h_1]$ . Параметры сред в объёмах  $V_i$  следующие:  $\epsilon_i, \mu_i$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости,  $k_i, W_i$  – постоянная распространения и волновое сопротивление  $i$ -го слоя,  $i = 1, 2, 3$  или 4. Необходимо определить распределения составляющих вектора поверхностной плотности магнитного тока на поверхностях  $S_{oi}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) свободных от элементов печатных решеток на границах раздела сред многослойной ЧИП и обозначенных на рисунке 1 как переизлучающие апертуры. В большинстве приложений ЧИП наибольший интерес представляет случай возбуждения металлодиэлектрической ЧИР плоской волной, когда расстояние между областью  $V_j$  и решеткой  $R_j \rightarrow \infty$ . Это означает, что, как правило, по найденным токам требуется определить элементы поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) [14, 15] этой электродинамической структуры и проанализировать зависимости характеристик рассеяния такой ЧИП от формы, составляющих ее печатных элементов, толщины и электрофизических параметров материалов, используемых при создании ее составной магнитодиэлектрической подложки.

Поскольку при анализе характеристик рассеяния вышеописанной печатной дифракционной решётки наибольший интерес представляет резонансная область [16], то для решения поставленной задачи воспользуемся методом интегральных уравнений [17].

**3. Математическое моделирование. 3.1. Система интегральных уравнений задачи.** Получим соотношения для полей в каждой из областей (рис. 1), используя лемму Лоренца в интегральной форме [18]. В качестве возбуждающего источника для области  $V_1$  выберем элементарный магнитный вибратор. В качестве

вспомогательных задач рассмотрим задачи возбуждения элементарными магнитными вибраторами каждой из областей, ограниченной идеально проводящими стенками. Удовлетворяя условию непрерывности касательных составляющих полей на границах раздела, получим систему из шести скалярных интегральных уравнений (ИУ), вид которой приведен в работе автора [19].

Применение условия периодичности позволяет вместо бесконечно-протяженной периодической решетки апертур рассматривать одну центральную апертуру. Поля рассеяния бесконечной решетки печатных элементов выражаются в виде двойных бесконечных сумм по пространственным гармоникам системы –  $m, n$  [20].

Итак, математическая модель трехрешеточной планарной переизлучающей частотно-избирательной электродинамической структуры представляет собой систему связанных векторных интегральных уравнений относительно поверхностных плотностей магнитных токов переизлучающих апертур. По найденным распределениям магнитных токов можно рассчитать все характеристики рассеяния частотно-избирательной решетки [21].

**3.2. Алгебраизация системы интегральных уравнений.** Из известных методов решения ИУ электродинамики наибольшее распространение получил метод моментов [22], заключающийся в том, что для разложения неизвестной функции выбирается система базисных функций, определяется система пробных функций, берется скалярное произведение каждой пробной функции с левой и правой частями интегрального уравнения, в итоге получается система линейных алгебраических уравнений. В результате решения этой системы определяются комплексные коэффициенты разложения неизвестной функции.

Воспользуемся одной из наиболее распространенных модификаций метода моментов – методом Галеркина. В качестве базисных и пробных функций выберем функции в виде треугольной призмы [23].

В результате получим систему линейных алгебраических уравнений, вид которой приведен в работе автора [24].

Коэффициенты СЛАУ имеют смысл собственных и взаимных проводимостей между элементами разложений составляющих поверхностных магнитных токов переизлучающих апертур (рис. 1) и вычисляются в явном виде [25]. Определение коэффициентов СЛАУ представляет собой самую трудоемкую часть вычислительного алгоритма и занимает большую часть машинного времени. Это связано с тем, что коэффициенты СЛАУ представляют собой двойные ряды по гармоникам Флоке  $m, n$ . Дальнейшее решение задачи заключается в решении СЛАУ и не вызывает затруднений, поскольку этот этап полностью перекладывается на вычислительную машину.

**4. Численные результаты.** Ниже в качестве примера приводятся результаты численного исследования характеристик рассеяния, в качестве которых выступают элементы матрицы рассеяния  $[S]$ , частотно-избирательной поверхности (ЧИП), выполненной в виде плоской металлодиэлектрической дифракционной решетки. Предложено два варианта возможной конструктивной реализации ЧИП. При разработке каждого из этих вариантов учитывалось требование по обеспечению частотной развязки близкорасположенных антенных систем приемо-передающих РЭС, работающих в смежных частотных диапазонах.

**4.1. Постановка задачи конструктивного синтеза частотно-избирательного антенного обтекателя.** Пусть имеется два РЭС, в состав которых входят приемо-передающие антенные системы. Первое РЭС работает в двух узких диапазонах частот: в окрестности частоты  $f_0$  – 1-й поддиапазон ( $\Delta f_1$ ), и в окрестности частоты  $1,17f_0$  – 2-й поддиапазон ( $\Delta f_2$ ). Второе РЭС – в диапазоне частот от  $0,87f_0$  до  $0,93f_0$  – поддиапазон заграждаемых частот ( $\Delta f_3$ ). В первом РЭС требу-

ется обеспечить уровень пространственной развязки его приемной антенны от мешающего излучения, возбуждаемого передающей антенной второго РЭС, не менее чем на 23 дБ. При этом потери на прохождение волн сквозь антенный обтекатель на частотах первого РЭС не должны превышать 0,5 дБ.

**4.2. Результаты численного исследования характеристик печатного обтекателя.** Для целей пространственной развязки удобно использовать печатную дифракционную решетку из крестообразных элементов, изображенных на рис. 2.

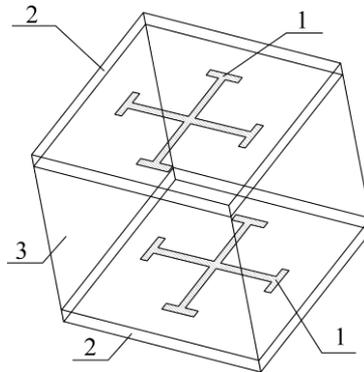


Рис. 2. Топология единичной ячейки металлодиэлектрической ЧИП: 1 – печатные вибраторы; 2 – диэлектрические укрытия; 3 – сердцевина

Как показано на рис. 2, печатные элементы 1 двух решеток с шагом равным  $0,3\lambda_0$  выполнены на диэлектрических подложках Rogers TMM 10i толщиной  $0,02\lambda_0$  каждая – 2. При этом каждый из печатных элементов выполнен в виде иерусалимского креста. Крестообразная форма вибратора позволяет обеспечить работу антенного обтекателя на произвольной поляризации, а дополнительные концевые емкостные нагрузки позволяют за счет уменьшения длин плеч печатных вибраторов снизить межэлементные интервалы в решетке и тем самым расширить полосу рабочих частот такого обтекателя. Диэлектрический слой, разделяющий печатные решетки и представляющий собой сердцевину ЧИП – 3, выполнен из материала Teflon 2,08 толщиной  $\lambda_0/4$ . Частотные характеристики (ЧХ) элементов матрицы [S] ЧИП показаны на рис. 3.

Поскольку, с одной стороны, антенный обтекатель находится в непосредственной близости от антенны РЭС, с другой стороны, взаимное положение РЭС, электромагнитную совместимость которых требуется обеспечить, в общем случае может быть произвольным, представляет интерес анализ ЧХ антенного обтекателя в секторе углов падения возбуждающей его плоской электромагнитной волны (ЭМВ).

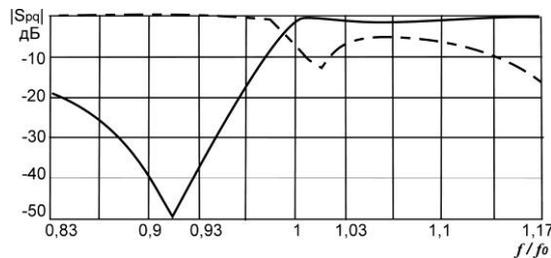


Рис. 3. Частотные характеристики модулей элементов матрицы рассеяния металлодиэлектрической ЧИП: коэффициент передачи  $S_{pq}$  ( $p \neq q$ ) – сплошная линия; коэффициент отражения  $S_{pq}$  ( $p = q$ ) – пунктир

Рассмотрим характеристики рассеяния антенного обтекателя в полосе заграждения  $\Delta f_3$  и двух полосах прохождения  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ .

На рис. 4 показаны ЧХ вышеописанного антенного обтекателя в полосе  $\Delta f_3$  в секторе углов от нормального падения -  $0^\circ$  до скользящего -  $85^\circ$ .

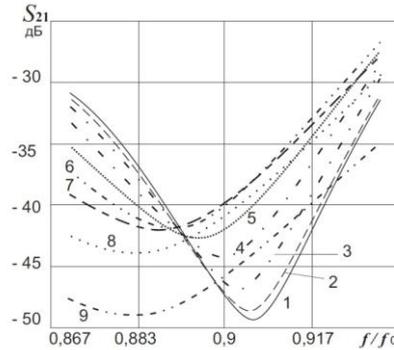


Рис. 4. ЧХ модулей недиагональных элементов матрицы рассеяния металло-диэлектрической ЧИП при различных углах падения  $\theta$ : 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 10^\circ$ ; 3 –  $\theta = 20^\circ$ ; 4 –  $\theta = 30^\circ$ ; 5 –  $\theta = 40^\circ$ ; 6 –  $\theta = 50^\circ$ ; 7 –  $\theta = 60^\circ$ ; 8 –  $\theta = 70^\circ$ ; 9 –  $\theta = 80^\circ$

На рис. 5 показаны ЧХ вышеописанного антенного обтекателя в полосе  $\Delta f_1$  в секторе углов от нормального падения -  $0^\circ$  до скользящего -  $85^\circ$ .

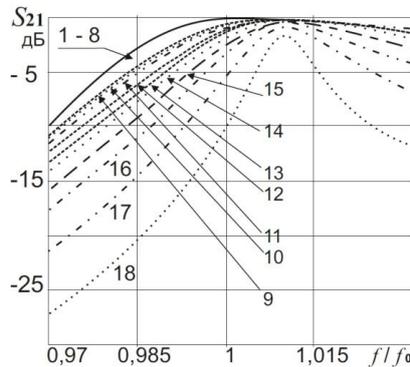


Рис. 5. ЧХ модулей недиагональных элементов матрицы рассеяния металло-диэлектрической ЧИП при углах падения  $\theta$ : 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 5^\circ$ ; 3 –  $\theta = 10^\circ$ ; 4 –  $\theta = 15^\circ$ ; 5 –  $\theta = 20^\circ$ ; 6 –  $\theta = 25^\circ$ ; 7 –  $\theta = 30^\circ$ ; 8 –  $\theta = 35^\circ$ ; 9 –  $\theta = 40^\circ$ ; 10 –  $\theta = 45^\circ$ ; 11 –  $\theta = 50^\circ$ ; 12 –  $\theta = 55^\circ$ ; 13 –  $\theta = 60^\circ$ ; 14 –  $\theta = 65^\circ$ ; 15 –  $\theta = 70^\circ$ ; 16 –  $\theta = 75^\circ$ ; 17 –  $\theta = 80^\circ$ ; 19 –  $\theta = 85^\circ$

На рис. 6 показаны ЧХ вышеописанного антенного обтекателя в полосе  $\Delta f_2$  в секторе углов от нормального падения -  $0^\circ$  до скользящего -  $85^\circ$ .

Поскольку введение частотно-избирательного антенного обтекателя может привести к внутреннему рассогласованию в системе антенна – обтекатель, что может негативно отразиться на параметрах антенны первого РЭС, несомненный интерес представляет анализ ЧХ диагональных элементов матрицы рассеяния антенного обтекателя в рабочих поддиапазонах  $\Delta f_1$  и  $\Delta f_2$ .

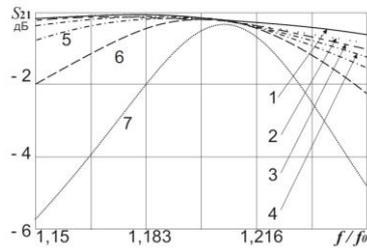


Рис. 6. ЧХ модулей недиагональных элементов матрицы рассеяния металло-диэлектрической ЧИП при различных углах падения  $\theta$ : 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 10^\circ$ ; 3 –  $\theta = 30^\circ$ ; 4 –  $\theta = 40^\circ$ ; 5 –  $\theta = 50^\circ$ ; 6 –  $\theta = 60^\circ$ ; 7 –  $\theta = 70^\circ$ ; 8 –  $\theta = 80^\circ$

На рис. 7 показаны ЧХ диагональных элементов матрицы рассеяния вышеописанного антенного обтекателя в полосе  $\Delta f_1$  в секторе углов от нормального падения -  $0^\circ$  до скользющего -  $85^\circ$ .

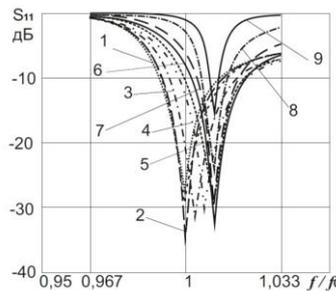


Рис. 7. ЧХ модулей диагональных элементов матрицы рассеяния металло-диэлектрической ЧИП при различных углах падения  $\theta$ : 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 10^\circ$ ; 3 –  $\theta = 20^\circ$ ; 4 –  $\theta = 30^\circ$ ; 5 –  $\theta = 40^\circ$ ; 6 –  $\theta = 50^\circ$ ; 7 –  $\theta = 60^\circ$ ; 8 –  $\theta = 70^\circ$ ; 9 –  $\theta = 80^\circ$

На рис. 8 показаны ЧХ диагональных элементов матрицы рассеяния вышеописанного антенного обтекателя в полосе  $\Delta f_2$  в секторе углов от нормального падения -  $0^\circ$  до скользющего -  $85^\circ$ .

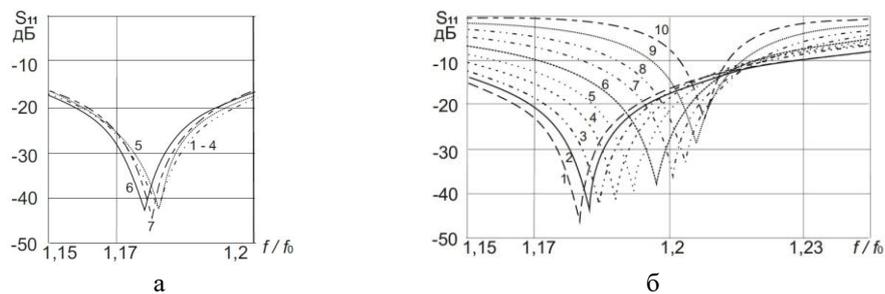


Рис. 8. ЧХ модулей диагональных элементов матрицы рассеяния металло-диэлектрической ЧИП при различных углах падения  $\theta$ : а – углы падения близкие к нормали: 1 –  $\theta = 0^\circ$ ; 2 –  $\theta = 5^\circ$ ; 3 –  $\theta = 10^\circ$ ; 4 –  $\theta = 15^\circ$ ; 5 –  $\theta = 25^\circ$ ; 6 –  $\theta = 30^\circ$ ; 7 –  $\theta = 35^\circ$ ; б – углы падения близкие к скользющему падению: 1 –  $\theta = 40^\circ$ ; 2 –  $\theta = 45^\circ$ ; 3 –  $\theta = 50^\circ$ ; 4 –  $\theta = 55^\circ$ ; 5 –  $\theta = 60^\circ$ ; 6 –  $\theta = 65^\circ$ ; 7 –  $\theta = 70^\circ$ ; 8 –  $\theta = 75^\circ$ ; 9 –  $\theta = 80^\circ$ ; 10 –  $\theta = 85^\circ$

На основе анализа вышеприведенных ЧХ элементов матрицы рассеяния вышеописанного антенного обтекателя получены его угловые характеристики, показанные на рис. 9.

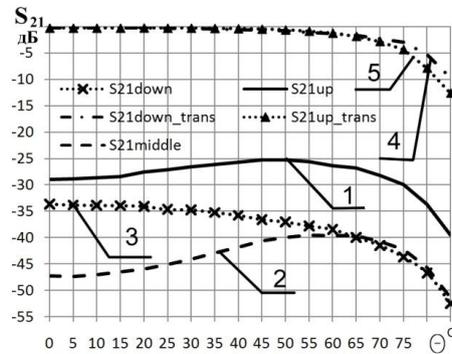


Рис. 9. Угловые характеристики модулей недиагональных элементов матрицы рассеяния металлодиэлектрической ЧИП на различных частотах: 1 – на верхней частоте поддиапазона заграждения  $\Delta f_3$ ; 2 – на центральной частоте  $\Delta f_3$ ; 3 – на нижней частоте  $\Delta f_3$ ; 4 – на частоте  $f_0$ ; 5 – на частоте  $1,17 f_0$

Таким образом, на основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что описанный выше частотно-избирательный антенный обтекатель полностью удовлетворяет, предъявляемым к нему требованиям.

Однако, несмотря на то, что описанная выше ЧИП полностью удовлетворяет сформулированным выше требованиям как к уровню развязки на нерабочих частотах, так и допустимым потерям в диапазоне рабочих частот, введение в состав ЧИП тефлоновой сердцевины значительной толщины приводит к существенному росту массы обтекателя. В случае крупноапертурных антенн такое решение может оказаться неприемлемым. Для снижения массы ЧИП заменим тефлоновую сердцевину многослойной воздушно-диэлектрической структурой. Два тонких слоя материала Rogers TMM 4 толщиной  $\sim 0,03\lambda_0$  каждый и разделенные воздушной прослойкой находятся в середине сердцевины. Два слоя из материала Rogers RO3003M той же толщины примыкают к печатным решеткам и, разделенные воздушно-диэлектрическими прослойками, установлены на периферии сердцевины.

На рис. 10 показаны ЧХ модулей элементов поляризационной матрицы рассеяния  $S_{pq}$  данной ЧИП.

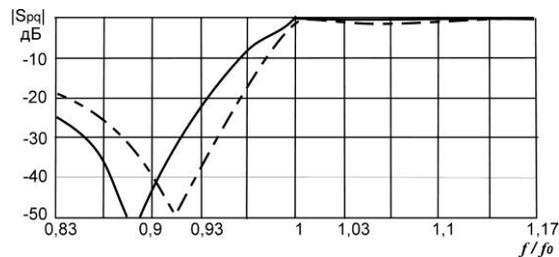


Рис. 10. Частотные зависимости модулей коэффициентов передачи  $S_{pq}$  ( $p \neq q$ ) металлодиэлектрической ЧИП: со сплошной сердцевиной на основе фторопласта – пунктир; с составной сердцевиной в виде многослойной воздушно-диэлектрической структуры – сплошная линия.

Как видно из графиков, частотно-избирательный антенный обтекатель на основе ЧИП с составной сердцевинной в виде многослойной воздушно-диэлектрической структуры, полностью удовлетворяет, предъявляемым к нему требованиям, но по массе является более предпочтительным, нежели обтекатель в виде ЧИП со сплошной сердцевинной на основе фторопласта.

**Заключение.** На основе численных исследований характеристик рассеяния многоэлементных мультипланарных решеток печатных элементов выработаны рекомендации по конструкционным параметрам многослойной ЧИП, выступающей в качестве многофункционального антенного обтекателя цифровой активной фазированной антенной решетки (АФАР) приемо-передающего РЭС. Проведенные численные исследования дают право утверждать, что использование микрополосковых отражательных антенных решеток с печатными элементами, имеющими сложную топологию на многослойных магнитодиэлектрических подложках, открывает дополнительные возможности по частотной фильтрации полей прошедших сквозь такие решетки волн, обеспечивая возможность развязки источников, имеющих близкие рабочие частоты, что позволяет рекомендовать их для использования в составе обтекателей современных РЭС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каплун В.А.* Обтекатели антенн СВЧ (Радиотехнический расчет и проектирование). – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.
2. *Красюк В.Н.* Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями. – Л.: Судостроение, 1986.
3. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование: монография. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
4. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Численное исследование многофункциональных обтекателей антенн судовых РЛС // Матер. 3-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» – (ПТСПИ'99). – Владимир, 1999. – С. 160-166.
5. *Касьянов А.О., Кошкидько В.Г.* Применение электродинамических методов анализа при разработке антенных систем судовых РЛС // Известия ТРТУ. – 2000. – № 1. – С. 19.
6. *Касьянов А.О.* Обтекатель антенны судовой радиолокационной станции // Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2003, 16-20 июня 2003 г. – Таганрог: ТРТУ. – С. 96-99.
7. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Дифракционные решетки как устройства пространственно-частотной и поляризационной селекции // Сб. трудов III Международного симпозиума «Конверсия науки – международному сотрудничеству» (Сибконверс'99). – Томск, 1999. – С. 406-408.
8. *Kasyanov A.O., Obukhovets V.A.* Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays // Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED'98, 2-5 November 1998, Tbilisi. – P. 46-49.
9. *Касьянов А.О., Обуховец В.А.* Поляризационные фильтры, преобразователи и модуляторы на основе управляемых микрополосковых дифракционных решеток // Всерос. конф. «Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности»: Сб. тр. Ч. 2. – Таганрог, 1999. – С. 121-126.
10. *Munk B.A.* Frequency Selective Surfaces: Theory and Design // John Wiley. US. – 2000.
11. *Schennum G.H.* Frequency-Selective Surfaces for Multiple-Frequency Antennas // Microw. J. – 1973. – Vol. 16 (5). – P. 55-57, 76.
12. *Rubin B.J., Bertoni H.L.* Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation // IEEE Trans. – 1983. – Vol. AP-31, No. 6. – P. 829-836.
13. *Galka M., Edenhofer P.* A novel concept of sandwich-loaded grid for antennas in satellite communications. U.R.S.I. Int. Symp. EM Theory. Budapest. Aug. 1986. Pt. B. – P. 393-395.
14. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975.
15. *Edenhofer P., Alpaslan A.* Electronically Tunable Frequency Selective Surfaces for Antenna Applications // Proceedings of the 3rd International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 8-11 September 1999. – P. 32-35.

16. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А., Сиренко Ю.К. Резонансное рассеяние волн. Т. 1. Дифракционные решетки. – Киев: Наукова думка, 1986.
17. Васильев Е.Н., Ильинский А.С., Свеишиков А.Г. Численные методы решения задач дифракции на локальных неоднородностях // Вычислительные методы и программирование. – М.: МГУ. 1975. – Вып. 24. – С. 3-13.
18. Bailey M.C., Deshpande M.D. Integral equation formulation of microstrip antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. AP-30, No. 4. – P. 651-656.
19. Касьянов А.О., Обуховец В.А. Металлодиэлектрические частотно-избирательные поверхности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14, № 11. – С. 29-38.
20. Guo Y.J., Barton S.K. Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1995. – Vol. AP-43, No. 4. – P. 350-355.
21. Касьянов А.О. Частотно-избирательные поверхности. Методы проектирования и области применения: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 150 с.
22. Moore J., Pizer R. Moment Methods in Electromagnetics. Techniques and Applications. – N.Y.: John Wiley & Sons Inc., 1981.
23. Rubin B.J. Scattering from a periodic arrays of apertures or plates where the conductors have arbitrary shape, thickness, and resistivity // IEEE TAP. – November, 1986. – Vol. AP-34, No 11.
24. Касьянов А.О., Касьянова А.Н. Электродинамический анализ и разработка САПР-ориентированных математических моделей печатных антенных решеток: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮБК, 2017. – 300 с.
25. Harrington R.F. Field Computation by Moment Method. – N.Y.: McMillan, 1968.

## REFERENCES

1. Kaplun V.A. Obtekateli antenn SVCh (Radiotekhnicheskiy raschet i proektirovanie) [Fairings of microwave antennas (Radio engineering calculation and design)]. Moscow: Sov. radio, 1974, 240 p.
2. Krasnyuk V.N. Antenny SVCh s dielektricheskimi pokrytiyami [Microwave antennas with dielectric coatings]. Leningrad: Sudostroenie, 1986.
3. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Mikropoloskovye otrazhatel'nye antennye reshetki. Metody proektirovaniya i chislennoe modelirovanie: monografiya [Microstrip reflective antenna arrays. Design methods and numerical modeling: monograph]. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 240 p.
4. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Chislennoe issledovanie mnogofunktsional'nykh obtekatel'ey antenn sudovykh RLS [Numerical study of multifunctional radome radars antennas], Mater. 3-y MNTK «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii» – (PTSPI'99) [Materials of 3-th international science-technical conference "Perspective technologies in the mass of information transmission" – (PDP'99)]. Vladimir, 1999, pp. 160-166.
5. Kas'yanov A.O., Koshkid'ko V.G. Primenenie elektrodinamicheskikh metodov analiza pri razrabotke antennykh sistem sudovykh RLS [Application of electrodynamic analysis methods in the development of ship radar antenna systems], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2000, No. 1, pp. 19.
6. Kas'yanov A.O. Obtekatel' antenny sudovoy radiolokatsionnoy stantsii [Ship radar antenna fairing], *Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln» IREMV-2003, 16-20 iyunya 2003 g.* [Proceedings of the International Scientific Conference "Radiation and Scattering of electromagnetic waves" IREMV-2003, June 16-20, 2003]. Taganrog: TRTU, pp. 96-99.
7. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Difraktsionnye reshetki kak ustroystva prostranstvenno-chastotnoy i polarizatsionnoy selektsii [Diffraction gratings as devices of spatial-frequency and polarization selection], *Sb. trudov III Mezhdunarodnogo simpoziuma «Konversiya nauki – mezhdunarodnomu sotrudnichestvu» (Sibkonvers'99)* [Proceedings of the III International Symposium "Conversion of Science to International Cooperation"(Sibconvers '99)]. Tomsk, 1999, pp. 406-408.
8. Kasyanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizing filters, converters and modulators based on controllable microstrip diffraction arrays, *Proceedings of III International Seminar/Workshop on DIPED '98, 2-5 November 1998, Tbilisi*, pp. 46-49.

9. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Polarizatsionnye fil'try, preobrazovateli i modulyatory na osnove upravlyaemykh mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok [Polarized filters, converters and modulators based on controlled microstrip diffraction gratings], *Vseros. konf. «Komp'yuternye tekhnologii v inzhenernoy i upravlencheskoy deyatel'nosti»: Sb. tr.* [All-Russian Conference "Computer Technologies in Engineering and Management Activities": Collection of works]. Part 2. Taganrog, 1999, pp. 121-126.
10. Munk B.A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, *John Wiley. US*, 2000.
11. Schennum G.H. Frequency-Selective Surfaces for Multiple-Frequency Antennas, *Microw. J.*, 1973, Vol. 16 (5), pp. 55-57, 76.
12. Rubin B.J., Bertoni H.L. Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation, *IEEE Trans.*, 1983, Vol. AP-31, No. 6, pp. 829-836.
13. Galka M., Edenhofer P. A novel concept of sandwich-loaded grid for antennas in satellite communications. U.R.S.I. Int. Symp. EM Theory. Budapest. Aug. 1986. Pt. B, pp. 393-395.
14. Kobak V.O. Radiolokatsionnye otrazhateli [Radar reflectors]. Moscow: Sov. radio, 1975.
15. Edenhofer P., Alpaslan A. Electronically Tunable Frequency Selective Surfaces for Antenna Applications, *Proceedings of the 3rd International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 8-11 September 1999*, pp. 32-35.
16. Shestopalov V.P., Kirilenko A.A., Masalov S.A., Sirenko Yu.K. Rezonansnoe rasseyanie voln [Resonance scattering of waves]. Vol. 1. *Difraktsionnye reshetki* [Diffraction gratings]. Kiev: Naukova dumka, 1986.
17. Vasil'ev E.N., Il'inskiy A.S., Sveshnikov A.G. CHislennyye metody resheniya zadach difraktsii na lokal'nykh neodnorodnostyakh [Numerical methods for solving diffraction problems on local inhomogeneities], *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming]. Moscow: MGU. 1975, Issue 24, pp. 3-13.
18. Bailey M.C., Deshpande M.D. Integral equation formulation of microstrip antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, Vol. AP-30, No. 4, pp. 651-656.
19. Kas'yanov A.O., Obukhovets V.A. Metalldielektricheskie chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti [Metal-dielectric frequency-selective surfaces], *Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2009, Vol. 14, No. 11, pp. 29-38.
20. Guo Y.J., Barton S.K. Phase Correcting Zonal Reflector Incorporating Rings, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, Vol. AP-43, No. 4, pp. 350-355.
21. Kas'yanov A.O. Chastotno-izbiratel'nye poverkhnosti. Metody proektirovaniya i oblasti primeneniya: monografiya [Frequency-selective surfaces. Design methods and applications: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 150 p.
22. Moore J., Pizer R. Moment Methods in Electromagnetics. Techniques and Applications. N.Y.: John Wiley & Sons Inc., 1981.
23. Rubin B.J. Scattering from a periodic arrays of apertures or plates where the conductors have arbitrary shape, thickness, and resistivity, *IEEE TAP*. November, 1986, Vol. AP-34, No 11.
24. Kas'yanov A.O., Kas'yanova A.N. Elektrodinamicheskyy analiz i razrabotka SAPR-orientirovannykh matematicheskikh modeley pechatnykh antenykh reshetok: monografiya [Electrodynamics analysis and development of CAD-oriented mathematical models of printed antenna arrays: monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuYK, 2017, 300 p.
25. Harrington R.F. Field Computation by Moment Method. N.Y.: McMillan, 1968.

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

**Касьянов Александр Олегович** – Южный федеральный университет; e-mail: kasao@mail.ru, kasyanovao@sfedu.ru; 347900, Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; д.т.н.; профессор.

**Kasyanov Aleksandr Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: kasao@mail.ru, kasyanovao@sfedu.ru; 105, Bolshaya Sadovaya street, Rostov-on-Don, 347900, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor.