

PACS numbers: 82.33.Xj, 29.25.Ni

## ФИЛЬТР ПЛОСКОЙ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ СО МНОЖЕСТВЕННЫМИ ПОЛЮСАМИ ЗАПИРАНИЯ НА ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

*Л.П. Мосьян*

Институт радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова,  
ул. ак. Проскуры, 12, 61085, Харьков, Украина  
E-mail: [lyuda@ire.kharkov.ua](mailto:lyuda@ire.kharkov.ua)

*Представлены результаты численного моделирования рассеяния плоской линейно поляризованной волны на многоапертурной частотно-селективной поверхности и синтеза полосно-пропускающих фильтров с множественными дополнительными полюсами запираения на частотной характеристике. Фильтры образованы тремя последовательно расположенными перфорированными экранами. Показано, что внесение дополнительных полюсов запираения в частотную характеристику фильтра обеспечивают экраны, элементарная ячейка которых содержит несколько различающихся прямоугольных апертур.*

**Ключевые слова:** РЕЗОНАНС ОТРАЖЕНИЯ, ФИЛЬТР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИК, ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ.

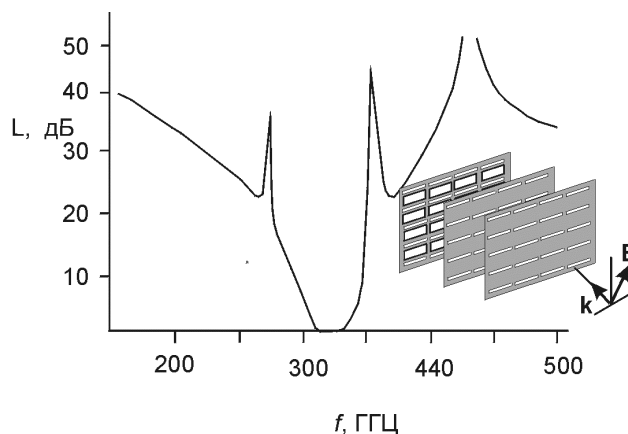
*(Получено 08.09.2009, в отредактированной форме – 29.09.2009)*

### ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные поверхности широко применяются в устройствах разделения сигналов в диапазоне частот от 1 ГГц до 1 ТГц. Они обычно реализуются как наборы металлических диполей, периодически расположенных на диэлектрической подложке или как периодические перфорированные экраны [1]. Частотно-селективные поверхности (ЧСП) первого типа обеспечивают отражение падающей плоской линейно поляризованной волны в окрестности заданной длины волны, равной примерно половине длины диполя. Перфорированные экраны формируют резонанс полного прохождения на длине волны, примерно равной половине длины щели. Более сложная, например, полосовая частотная характеристика, обычно реализуется посредством нескольких последовательно расположенных ЧСП [1, 2]. Вместе с тем в последнее время наметилась тенденция использовать так называемые многоэлементные ЧСП, периодические ячейки которых содержат несколько резонансных элементов, что позволяет реализовать сложную частотную характеристику с помощью однослойной структуры. Как правило, такие структуры обеспечивают многорезонансную характеристику. Решетки из диполей формируют характеристику с несколькими резонансами отражения [3, 4], а многоэлементные экраны обеспечивают резонансное пропускание падающей волны на нескольких частотах одновременно [5]. В данной работе исследованы именно такие перфорированные экраны с несколькими апертурами на периодической ячейке. Однако здесь эта структура рассмотрена как ЧСП, которая может формировать узкополосную запирающую характеристику – свойство, характерное для решетки из диполей, а не для перфорированного экрана. По сути дела, речь идет о том

же эффекте полного отражения, который был выявлен для многослойных резонансных диафрагм в волноводах [6] и был использован как новый способ реализации метода внесенных полюсов запираия при проектировании волноводных полосно-пропускающих фильтров [7]. Исходя из сходной структуры электромагнитных полей в задачах дифракции на диафрагме в волноводе и на перфорированном экране, естественно ожидать и сходных результатов, тем более, что волноводное моделирование антенных решеток является общепринятым методом проверки численных расчетов [8].

Данная работа посвящена исследованию возможности формирования многоапертурными перфорированными экранами именно резонанса полного отражения. В работе показано, что, манипулируя количеством апертур и их геометрическими размерами, можно сформировать частотную характеристику не только с одним, но и несколькими резонансами отражения. Перфорированные экраны с такими свойствами использованы в работе как конструктивные элементы полосно-пропускающих фильтров, при этом именно они обеспечивают формирование квазиэллиптической частотной характеристики. В статье рассмотрен фильтр плоской линейно поляризованной волны, состоящий из трех последовательно расположенных перфорированных экранов. В рамках классического подхода каждый перфорированный экран обеспечивает полное прохождение падающей волны в окрестности заданной частоты  $f_c$ . Будучи расположенными на расстоянии  $\lambda_c/4$  на частоте  $f_c$ , такой фильтр обеспечивает полосно-пропускающую характеристику. Крутизна фронтов характеристики такого фильтра может быть существенно увеличена, если вместо классического перфорированного экрана использовать перфорированный экран с несколькими различающимися апертурами на элементарном периоде.



**Рис. 1** – Частотная характеристика трехслойной ЧСП с двумя дополнительными полюсами запираия

Прорезание дополнительных щелей обеспечивает внесение пары дополнительных полюсов запираия, расположенных на  $f_c - \Delta$  и  $f_c + \Delta$ , где  $\Delta$  – заданный частотный сдвиг. Как результат, частотная характеристика трехслойного фильтра приобретает квазиэллиптический характер. Типичная характеристика такого фильтра представлена на рис. 1.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследуемая структура представляет собой тонкий металлический экран толщиной  $t$ . Его элементарная ячейка представлена на рис. 2. Размеры ячейки –  $L_x \times L_y$ . В простейшем случае ячейка содержит две прямоугольные щели различающихся размеров ( $a_1 \times b_1$  и  $a_2 \times b_2$ ). На экран падает плоская линейно поляризованная волна  $H_{00}$ , вектор электрического поля которой в плоскости  $xOy$  ориентирован перпендикулярно щелям (т.е. вдоль оси  $Oy$ ).

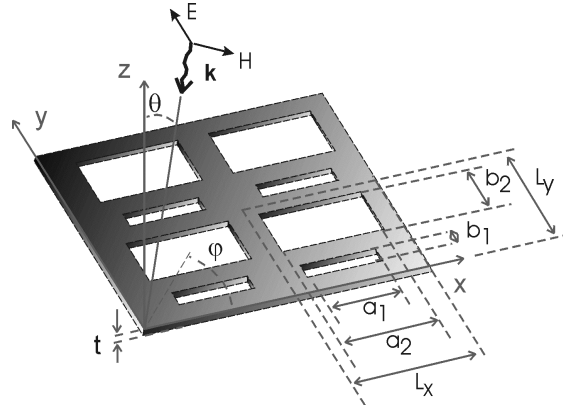


Рис. 2 – Двухапертурная ЧСП и ее элементарная ячейка

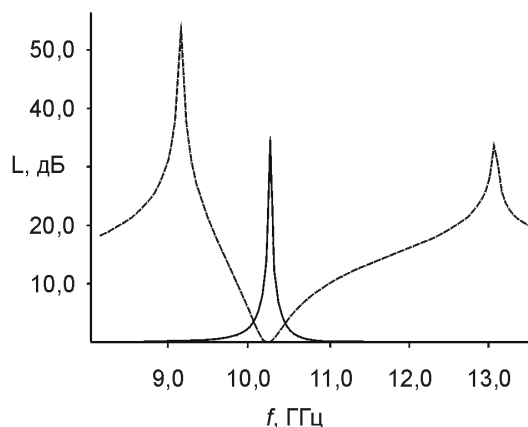
Для численного исследования характеристик рассеяния ЧСП были использованы метод частичных областей (МЧО-П) и метод обобщенных матриц рассеяния. При построении математической модели исследуемый многоапертурный экран представляется в виде двух элементарных неоднородностей, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Элементарной неоднородностью здесь является плоскостное соединение волноводного канала Флоке, поперечное сечение которого совпадает с сечением элементарной ячейки перфорированного экрана, и двух прямоугольных волноводов меньшего сечения. Элементарные неоднородности соединяются таким образом, что связь между ними осуществляется по прямоугольным волноводам. Матрицу рассеяния элементарной неоднородности получают, как уже упоминалось, решая соответствующую краевую задачу методом частичных областей. Найденные в результате решения задач дифракции ряда волн, падающих изо всех каналов последовательно, коэффициенты преобразования являются элементами матрицы рассеяния элементарной неоднородности. В свою очередь, полная матрица рассеяния резонансной диафрагмы рассчитывается по найденным матрицам рассеяния простейших плоскостных соединений. Число мод, учитываемое в численной реализации проекционного алгоритма, выбирается таким образом, чтобы максимальные поперечные волновые числа высших Н- и Е-мод (во всех волноводных каналах) были равны. Для нижеприведенных данных в расчетах учитывались 250-300 волн Флоке.

#### 5. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

На основе описанной выше математической модели были исследованы характеристики рассеяния многоапертурных экранов при нормальном падении  $H_{00}$ -волны, вектор электрического поля которой ориентирован

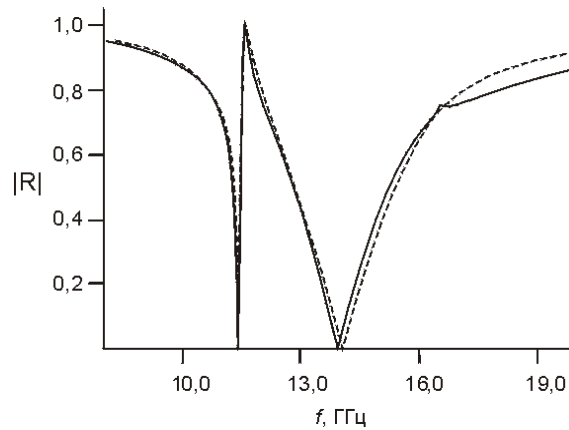
поперек щелей. Периодическая ячейка экрана содержала от двух до четырех прямоугольных щелей различающихся размеров. Полученные результаты можно кратко обобщить следующим образом. ЧСП, периодическая ячейка которой включает в себя только одинаковые щели, формирует резонансную характеристику полного прохождения, типичную для классических перфорированных экранов. Положение этого резонанса полного прохождения определяется, главным образом, длиной (широким размером) пары щелей, а его добротность – высотой щелей. Вид частотной характеристики меняется кардинально, если щели перестают быть одинаковыми. В частности, как было показано в [9] для двухапертурного экрана, как только размеры двух щелей (например,  $a_1$  и  $a_2$ ) начинают отличаться, на частотной характеристике появляется пара «резонанс – высокодобротный антирезонанс». По мере увеличения разницы  $|a_1 - a_2|$  антирезонанс – т.е. резонанс полного отражения – становится менее добротным, а его частота изменяется. В предельном случае на частотной характеристике формируются два резонанса полного прохождения, разделенные широкой полосой запираия. Это именно те множественные резонансы прохождения, которые и были исследованы в [5].

Настоящее же исследование сфокусировано на отражательных свойствах многоапертурных экранов. Было установлено, что подбором геометрических параметров задачи можно добиться формирования ярко выраженного узкополосного резонанса полного отражения (так же, как и для многощелевых диафрагм в прямоугольном волноводе [6]), всегда расположенного между двумя резонансами полного прохождения. Пример частотной характеристики такого двухапертурного экрана с двумя щелями различающихся размеров представлен на рис. 3. Размеры периодической ячейки экрана  $L_x \times L_y = 23,0 \times 10,0$  мм<sup>2</sup>, толщина экрана  $t = 0,5$  мм. Размеры щелей  $a_1 \times b_1 = 13,5 \times 1,0$  мм<sup>2</sup> и  $a_2 \times b_2 = 22,95 \times 7,0$  мм<sup>2</sup>.



**Рис. 3** – Частотная характеристика двухапертурной ЧСП (сплошная кривая – вносимые потери, пунктирная кривая – обратные потери)

Как видно из рисунка, исследуемая ЧСП формирует характеристику с точкой полного запираия падающей волны. При этом такая характеристика не является типичной для перфорированных экранов, обычно формирующих пропускающую характеристику. То есть в данном случае многоапертурная ЧСП демонстрирует свойства, характерные для решетки из полуволновых диполей, а не для перфорированного экрана.

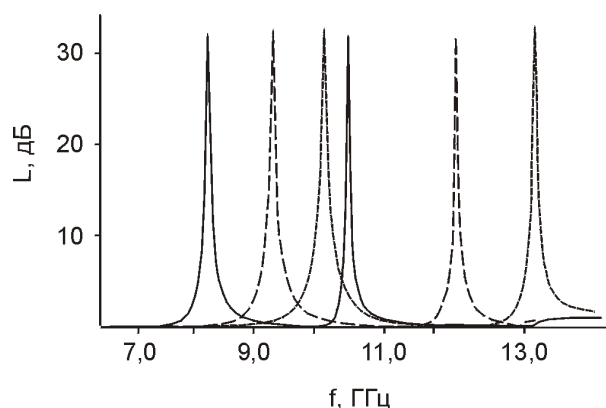


*Рис. 4 – Частотная характеристика двухапертурной ЧСП, построенная на основе строгого решения - задача дифракции (сплошная кривая) и ее аппроксимация с учетом двух комплексных собственных колебаний – решение спектральной задачи (пунктирная кривая)*

Нетривиальное свойство многоапертурных ЧСП формировать режекторную частотную характеристику имеет ту же физическую интерпретацию, что и явление полного отражения многощелевыми диафрагмами в прямоугольном волноводе [6]. Физической основой этого резонанса является возбуждение в ЧСП, рассматриваемой как открытый волноводный резонатор, пары собственных колебаний комплексной частоты и различающейся добротности. Так, например, на рисунке 4 приведена частотная характеристика двухапертурной ЧСП, полученная путем решения дифракционной задачи (сплошная кривая). Пунктирной линией нанесена частотная характеристика, восстановленная по паре комплексных собственных частот с помощью аналитического выражения [10] для частотных зависимостей элементов матрицы рассеяния открытой структуры волноводного типа в области комплексных частот. Размеры периодической ячейки ЧСП  $L_x \times L_y = 18,1 \times 14,3 \text{ мм}^2$ , толщина экрана  $t = 0,3 \text{ мм}$ . Размеры щелей  $a_1 \times b_1 = 11,0 \times 1,1 \text{ мм}^2$ ,  $a_2 \times b_2 = 12,1 \times 1,2 \text{ мм}^2$ .

Как видно из рисунка, аппроксимационная кривая вполне удовлетворительно описывает частотную характеристику как в резонансных областях, так и в нерезонансной зоне.

Многоапертурный экран может быть использован для запирания падающей волны и на нескольких частотах одновременно. Периодическая ячейка такого экрана включает в себя большее (чем два) число прямоугольных щелей. Так, например, экран с тремя различающимися щелями на периоде формирует частотную характеристику с двумя резонансами полного отражения. Пример такой характеристики приведен на рис. 5. Положение каждого резонанса отражения определяется, главным образом, длиной одной из щелей. Т.е. зависимость положения резонансов от геометрических параметров практически та же, что и для ЧСП с двумя различающимися щелями на элементарном периоде. Так, изменение размеров щели большей длины при фиксированных остальных размерах приводит, главным образом, к изменению положения низкочастотного резонанса полного отражения. При увеличении длины этой щели низкочастотный резонанс смещается в область низких частот, и наоборот. То же справедливо и для высокочастотного резонанса



*Рис. 5 – Смещение резонансов полного отражения при одновременном изменении ширины щелей*

отражения. Его положение определяется, главным образом, размерами меньшей щели. Одновременное изменение частот резонансов полного отражения также возможно. На рис. 5 представлены характерные зависимости изменения положения двух резонансов при одновременном изменении длин двух щелей (все остальные геометрические параметры зафиксированы). Размеры периодической ячейки трехщелевой ЧСП –  $L_x \times L_y = 23 \times 16 \text{ мм}^2$ , толщина экрана –  $t = 0,3 \text{ мм}$ . Неизменяемые размеры щелей –  $a_2 \times b_2 = 22,8 \times 10 \text{ мм}^2$ ,  $b_1 = 1 \text{ мм}$ ,  $b_3 = 1 \text{ мм}$ . Изменяемые размеры  $a_1 = 13; 11; 10 \text{ мм}$  и  $a_3 = 16; 14; 13 \text{ мм}$  (сплошная, пунктирная и штриховая кривые на рис. 5 соответственно).

Описанные выше ЧСП можно использовать не только как однослойные экраны, обеспечивающие отражение падающей волны на одной или нескольких частотах, но и как элементы полосно-пропускающих фильтров (ППФ). В этом случае многощелевые ЧСП будут вносить в частотную характеристику ППФ дополнительные полюса запираания. Здесь следует отметить, что единственным известным ранее способом внесения полюса запираания в частотную характеристику фильтра, реализованного на классических одноэлементных ЧСП, является такой подбор размеров периодической ячейки, что частотный диапазон возникновения высшей пространственной гармоники образует естественную полосу запираания в требуемом частотном диапазоне [11, 12]. В этом случае единственный полюс запираания всегда расположен справа от полосы пропускания. Фильтр с такой частотной характеристикой позволяет осуществить эффективное деление сигналов с малым частотным разнесом. Однако при этом сигнал, который должен пройти через экран с минимальными потерями, всегда должен иметь меньшую частоту, чем сигнал, который должен быть отражен.

Многощелевые ЧСП, рассмотренные в работе, позволяют реализовать новый метод внесения дополнительных полюсов запираания, обеспечивая при этом как произвольное расположение положения полюсов, так и само их число. Этот метод применим не только для разделения сигналов с близкими частотами, но и для увеличения внеполосного запираания [13]. Еще одним возможным применением является синтез полосно-пропускающих фильтров с квазиэллиптической характеристикой, обеспечивающих значительное увеличение крутизны фронтов характеристики.

В качестве примера была синтезирована трехслойная ЧСП, которая должна обеспечивать прохождение  $H_{00}$ -волны с углом падения 45 градусов в полосе частот 316,5 - 325,5 ГГц при вносимых потерях в полосе не более 0,05 дБ и внеполосными потерями не хуже 20 дБ. ЧСП состоит из трех перфорированных экранов, разнесенных на расстояние примерно  $\lambda_c/4$  на центральной частоте полосы пропускания  $f_c$ . Два экрана – это классические одноапертурные ЧСП, размеры которых выбраны так, что каждый из этих экранов обеспечивает полное прохождение падающей волны на центральной частоте полосы пропускания. Третий экран – это многоапертурная ЧСП, геометрические размеры которой выбраны так, что она вносит два полюса запираения на граничных частотах полос запираения. В результате такой фильтр формирует квазиэллиптическую частотную характеристику с большей (по сравнению с классическими фильтрами) крутизной фронтов частотной характеристики и более высоким внеполосным запираением. Частотная характеристика такого фильтра приведена на рис. 1. Размеры периодической ячейки всех экранов –  $L_x \times L_y = 0,5 \times 0,5$  мм<sup>2</sup>, толщина экранов –  $t = 0,01$  мм. Размеры щелей первого и второго классических экранов –  $a_1 \times b_1 = 0,3725 \times 0,015$  мм<sup>2</sup> и  $a_1 \times b_1 = 0,46 \times 0,015$  мм<sup>2</sup> соответственно. Периодическая ячейка многоапертурного экрана включает в себя две щели с размерами  $a_1 \times b_1 = 0,495 \times 0,015$  мм<sup>2</sup> и  $a_2 \times b_2 = 0,464 \times 0,015$  мм<sup>2</sup>. Расстояние между экранами – 0,143 мм.

Еще одним примером является синтез фильтра с четырьмя полюсами запираения, попарно расположенными слева и справа от полосы пропускания. Такой фильтр реализован как последовательно расположенные классическая ЧСП и два многоапертурных экрана. Каждый из многоапертурных экранов обеспечивает полное прохождение падающей волны на центральной частоте полосы пропускания и внесение пары полюсов запираения слева и справа от полосы пропускания на частотах  $f_c \pm \Delta_1$  и  $f_c \pm \Delta_2$ , где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – заданные частотные сдвиги. Частотная характеристика такого фильтра с четырьмя полюсами запираения представлена на рис. 6.

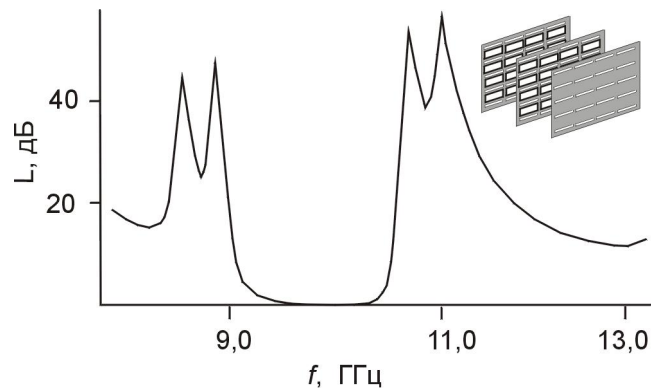


Рис. 6 – Частотная характеристика трехслойной ЧСП, нормальное падение  $H_{00}$ -волны

Размеры периодической ячейки всех экранов –  $L_x \times L_y = 23,0 \times 16,0 \text{ мм}^2$ , толщина экранов –  $t = 0,3 \text{ мм}$ . Размеры щелей первого классического экрана  $a_1 \times b_1 = 11,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ . Периодическая ячейка одного многоапертурного экрана содержит четыре щели с размерами  $a_1 \times b_1 = 22,8 \times 2,0 \text{ мм}^2$ ,  $a_2 \times b_2 = 16,0 \times 5,0 \text{ мм}^2$ ,  $a_3 \times b_3 = 22,8 \times 2,0 \text{ мм}^2$  и  $a_2 \times b_2 = 15,5 \times 1,0 \text{ мм}^2$ , а на периоде третьего многоапертурного экрана прорезано три щели  $a_1 \times b_1 = 22,8 \times 10,0 \text{ мм}^2$ ,  $a_2 \times b_2 = 16,0 \times 1,0 \text{ мм}^2$ ,  $a_3 \times b_3 = 12,0 \times 1,0 \text{ мм}^2$ . Расстояние между экранами –  $7,35 \text{ мм}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что использование многоапертурных перфорированных экранов позволяет эффективно реализовать новый метод внесения дополнительных полюсов запираения при синтезе фильтров пространственных гармоник. Отличительной особенностью метода является возможность внесения произвольного числа полюсов запираения на требуемых частотах. Это стало возможным благодаря выявленной нетривиальной особенности многоапертурных экранов, а именно возможности формировать частотную характеристику с несколькими резонансами полного отражения. Предложенные фильтры просты в исполнении, полностью совместимы с современным процессом их производства и обладают улучшенными характеристиками. И, наконец, отсутствие диэлектрического заполнения открывает дополнительную перспективу для использования таких фильтров в высокочастотных – вплоть до терагерцового – диапазонах.

Автор выражает глубокую признательность профессору А.А. Кириленко за полезное обсуждение полученных результатов.

#### SPATIAL FILTER WITH MULTIPLE EXTRACTED POLES

*L.P. Mospan*

Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine,  
12, Acad. Proskury Str., 61085, Kharkov, Ukraine  
E-mail: [lyuda@ire.kharkov.ua](mailto:lyuda@ire.kharkov.ua)

*We present the numerical simulation results of the scattering of a linearly polarized plane wave at a multi-aperture frequency-selective surface and two design examples for a spatial bandpass filter with multiple extracted poles. The filters are formed by three serial perforated screens. Shown that the screens, which elementary cell contains a number of different rectangular apertures, provide the introduction of locking poles.*

**Keywords:** REFLECTION RESONANCE, SPATIAL FILTER, FREQUENCY-SELECTIVE SURFACE.

#### ФИЛЬТР ПРОСТОРОВИХ ГАРМОНІК З ДОДАТКОВИМИ ПОЛЮСАМИ ЗАПИРАННЯ НА ЧАСТОТНІЙ ХАРАКТЕРИСТИЦІ

*Л.П. Моспан*

Інститут радіофізики та електроніки НАН України ім. О.Я. Усикова,  
вул. ак. Прокура, 12, 61085, Харків, Україна  
E-mail: [lyuda@ire.kharkov.ua](mailto:lyuda@ire.kharkov.ua)



Наведено результати чисельного моделювання розсіювання плоскої лінійно поляризованої хвилі багатоапертурною частотно-селективною поверхнею та синтезу смуго-пропускаючих фільтрів із множинними додатковими полюсами на частотній характеристиці. Фільтри являють собою низку послідовно розміщених перфорованих екранів. Внесення додаткових полюсів заширення забезпечують екрани, елементарний осередок яких містить декілька прямокутних отворів, що різняться за розмірами.

**Ключові слова:** РЕЗОНАНС ВІДБИТТЯ, ФІЛЬТР ПРОСТОРОВИХ ГАРМОНІК, ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНА ПОВЕРХНЯ.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. B.A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New Jersey: Wiley InterScience Publishing: 2000).
2. L.M. Araujo, R.H.C. Manicoba, A.L.P.S. Campos, A.G. d'Assuncao, *Microw. Opt. Techn. Let.* **51** No4, 942 (2009).
3. D. Sarkar, P.P. Sarkar, S. Das, S.K. Chowdhury, *Microw. Opt. Techn. Let.* **35** No2, 138 (2002).
4. D. Sarkar, P.P. Sarkar, S.K. Chowdhury, *Microw. Opt. Techn. Let.* **41** No6, 511 (2004).
5. J.A. Reed, D.M. Byrne, *J. Opt. Soc. Am. A* **15** No3, 660 (1998).
6. A.A. Kirilenko, L.P. Mospan, *IEEE T. Microw. Theory* **48** No8, 1419 (2000).
7. A.A. Kirilenko, L.P. Mospan, V.I. Tkachenko, *32nd European Microwave Conference*, 969 (2002).
8. N. Amitay, V. Galindo, C.P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas* (New Jersey: Wiley InterScience Publishing: 1972).
9. L.P. Mospan, O.V. Chistyakova, *International Symp. (MSMW-2004)*, 269 (2004).
10. A.A. Кириленко, С.Л. Сенкевич, Ю.К. Сиренко, Б.Г. Тысик, *Радиотехника и электроника*, **33** №3, 468 (1989).
11. S. Biber, M. Bozzi, O. Gunther, L. Perregrini, P. Schmidt, *35th European Microwave Conference*, 593 (2005).
12. R. Dickie, R. Cahill, V.F. Fusco, H.S. Gamble, B. Moyna, P. Huggard, N. Grant, C. Philpot, *IEE Proc. H* **151** No1, 31 (2004).
13. L. Mospan, A. Kirilenko, *35th European Microwave Conference*, 869 (2005).