

Поведение геометрических резонансов частотно-селективных экранов при изменении их толщины

Г.М. Ревунов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения «ГУАП»

Аннотация: в данной работе рассматривалось поведение геометрических резонансов частотно-селективных экранов при изменении их толщины. Исследована добротность системы в резонансе. Показано, что, добротностью фильтров можно управлять путем изменения толщины периодически перфорированных идеально проводящих экранов.

Ключевые слова: частотно-селективные экраны, резонанс, метаматериалы, режекторные фильтры.

1. Введение

В большинстве случаев частотно-селективные поверхности (*frequency selective surface, FSS*) являются идеально ведущими перфорированными экранами. В этом параграфе рассматриваются геометрические резонансы, присущие *PEC*-подобным дупериодическим структурам, выполненным из магнитоэлектрического слоя $\left(\varepsilon = 250 - i2,5 \cdot 10^6, \mu = \frac{1}{\varepsilon} \right)$ с квадратной ячейкой $L_{x_1} = L_{y_1} = L$, $\beta = 90^\circ$.

2. Результаты моделирования

На рисунке 1 изображены частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка, рассчитанные для модели *PEC*-образного магнитоэлектрического слоя, периодически перфорированного крестообразными отверстиями, для слоев различной толщины, а именно, $\frac{h}{L} = 0,01$ (тонкий), $\frac{h}{L} = 1,0$ (толстый) и $\frac{h}{L} = 5,0$ (сверхтолстый).

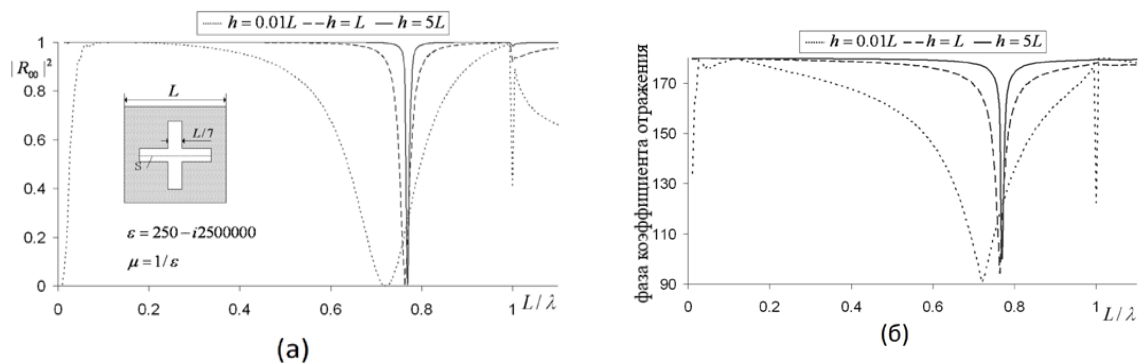


Рисунок 1. Зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка $|R_{00}|^2$ (а) и фазы коэффициента отражения гармоники нулевого порядка R_{00} (б) от нормированного периода структуры, рассчитанные для модели *PEC*-подобного магнитоэлектрического слоя, периодически перфорированного крестообразными отверстиями. Вектор напряженности падающего электрического поля параллельный оси x .

С целью выяснения природы резонансов все результаты рассчитывались для

нормального падения ($\theta = 0^\circ$) плоской волны на слой, поскольку в этом случае дифракционная картина является самой простой. Ширина и длина креста в элементарной ячейке $w = \frac{L}{7}$ и $s = \frac{5L}{7}$ указаны на вставке. Расчеты проводились с порядком срезания числа пространственных гармоник $(2N+1)^2 = 121$. Из рисунка 1 получается, что в указанном диапазоне длин волн присутствуют два резонанса. Первый резонанс, наблюдаемый вблизи $\frac{L}{\lambda} \approx 0,7$, соответствует резонансу на полуволновых апертурах одного из плеч креста с $s = \frac{5}{7}L$, а второй резонанс связан с резонансной длиной волны вблизи аномалии Вуда-Релея [1]. Ширина первого резонанса становится более узкой с увеличением толщины слоя за счет фильтровального эффекта волноводных каналов, проходящих сквозь слой. Добротность системы в резонансе для различных толщин перфорированного ПЕС-слоя равнялась 5,5, 24,5 и 82 соответственно. Добротность резонанса Q определялась как отношение между частотой резонанса и шириной частотного диапазона резонансной кривой на уровне половинного значения величины провала отражения. Следует отметить, что пунктирная кривая хорошо согласуется с результатом, рассчитанным для ПЕС-слоя, периодически перфорированного такими же крестообразными апертурами при $\frac{h}{L} = 0,01$ [2].

Более сложная поляризационно независимая конфигурация элементарной ячейки изображена на вставке (рисунок 2). Эта конфигурация, имеющая четырехкратную симметрию вращения, обычно упоминается как гаммадион. Длина и ширина апертуры в элементарной ячейке равны $s = \frac{11}{7}L$ и $w = \frac{L}{7}$ соответственно. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка $|R_{00}|^2$ и фазы коэффициента отражения гармоники нулевого порядка R_{00} , рассчитанные для ПЕС-образного слоя, периодически перфорированного отверстиями в форме гаммадиона, изображены на рисунке 2. Вектор напряженности падающего электрического поля параллельный оси x .

Расчеты производились с порядком усечения числа пространственных гармоник $(2N+1)^2 = 529$ для толщины слоя $\frac{h}{L} = 0,01$ и $(2N+1)^2 = 361$ для толщин слоя $\frac{h}{L} = 1,0$ и $\frac{h}{L} = 5,0$. Поскольку резонирующая длина гаммадион-подобной апертуры $s = \frac{11}{7}L$ больше, чем длина плеча креста $s = \frac{5}{7}L$ (рисунок 1), первый резонанс для гаммадион-образной апертуры, наблюдаемый на рисунке 2 смещается в более длинноволновую область по сравнению с первым резонансом на рисунке 1.

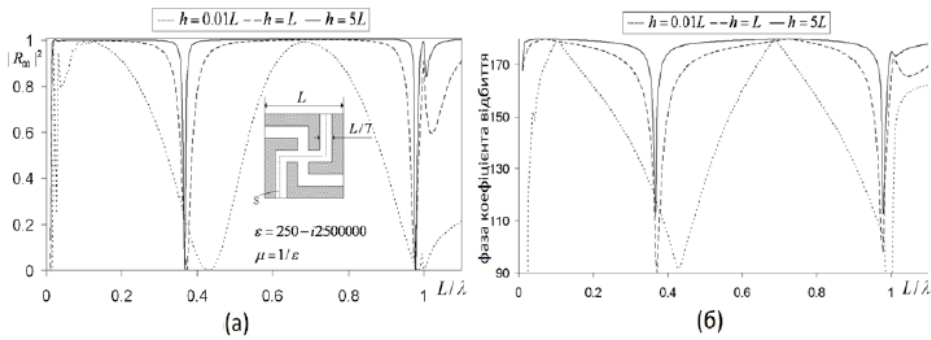


Рисунок 2. Зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка $|R_{00}|^2$ (а) и фазы коэффициента отражения гармоники нулевого порядка R_{00} (б) от нормированного периода структуры, рассчитанные для модели *PEC*-образного магнитоэлектрического слоя, периодически перфорированного гаммадион-подобными апертурами. Вектор напряженности падающего электрического поля параллельный оси x .

В первом резонансе длина гаммадион-образной апертуры примерно равна половине длины падающей волны, то есть $s = \frac{11}{7}L \approx \frac{\lambda}{2}$ [3]. Вторым резонанс появляется, когда длина гаммадион-образной апертуры s близка к $\frac{3}{2}\lambda$. В данном случае частота второго резонанса близка к частоте аномалии Релея для ± 1 -й пространственной гармоники при падении волны с вектором напряженности электрического поля, параллельным оси x или оси y . Рисунок 2 демонстрирует поведение добротности резонансных кривых с изменением толщины слоя, аналогичное поведению, которое было продемонстрировано для структуры, перфорированной крестообразными отверстиями (рисунок 1), то есть с увеличением толщины слоя добротность резонансов увеличивается. Для первого резонанса добротность резонирующей периодической системы при изменении толщины $\frac{h}{L} = 0,01$, $\frac{h}{L} = 1,0$, $\frac{h}{L} = 5,0$ равнялась 2,1; 15; 50 соответственно.

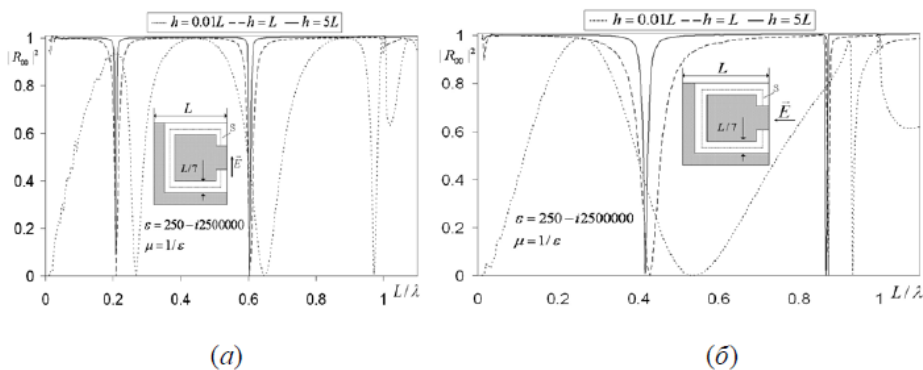


Рисунок 3. Зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка $|R_{00}|^2$ от нормированного периода структуры, рассчитанные для *PEC*-образного слоя, периодически перфорированного *C*-образными апертурами. Вектор напряженности падающего электрического поля параллельный оси y (а) и параллельный оси x (б).

На рисунке 3 изображены зависимости квадрата модуля коэффициента отражения гармоники нулевого порядка от нормированного периода структуры, рассчитаны для

PEC-подобного слоя, периодически перфорированного *C*-образными апертурами. Вектор напряженности падающего электрического поля параллельный оси *y* (рисунок 3 (а)) и параллельный оси *x* (рисунок 3 (б)). Конфигурацию элементарной ячейки и направление вектора напряженности падающего электрического поля изображены на вставках (рисунок 3 (а) и (б)). Ширина и длина *C*-образной апертуры равны $\frac{w}{L} = \frac{1}{7}$ и $\frac{s}{L} = \frac{18}{7}$ соответственно. Геометрия апертур обеспечивает сильную поляризационную чувствительность характеристик рассеяния. Расчеты проводились для порядка срезания количества пространственных гармоник $(2N+1)^2 = 361$ и с теми же параметрами материала *PEC*-подобного слоя, как для рисунка 1 и рисунка 2. Поскольку длина *C*-образной апертуры $\frac{s}{L} = \frac{18}{7}$ больше, чем длина гаммадион-подобной апертуры $s = \frac{11}{7}L$, первый резонанс, что наблюдается на рисунке 3 (а), смещается в более длинноволновую область спектра по сравнению с первым резонансом на рисунке 2. Второй резонанс появляется, когда длина апертуры $\frac{s}{L} = \frac{18}{7}$ близка к $\frac{3}{2}\lambda$. Третий резонанс появляется, когда длина апертуры близка к $5\lambda/2$. Следует отметить, что расположение резонансов на пунктирной кривой ($h = L$) совпадает с резонансами, рассчитанными для периодического массива *C*-образных *PEC*-элементов в свободном пространстве ($h = L$) [3], что соответствует принципу Бабине. Аналогичные результаты для квадрата модуля коэффициента отражения нулевой гармоники $|R_{00}|^2$ изображены на рисунке 3 (б). Здесь вектор напряженности электрического поля падающей плоской волны является параллельным оси *x*, и возбуждение структуры становится симметричным. Поскольку *C*-образные апертуры являются симметричными относительно оси *x*, резонансная длина уменьшается на половину длины *C*-апертуры, и, следовательно, первый резонанс смещается в область более коротких длин волн по сравнению с первым резонансом на рисунке 3 (а).

3. Заключение

Из сравнения зависимостей, изображенных на рисунке 3 (а) и рисунке 3 (б) с аналогичными зависимостями для периодического массива *C*-образных *PEC*-элементов в свободном пространстве [3], вытекает, что поляризационно зависимые свойства *PEC*-слоя, периодически перфорированного *C*-образными апертурами, также хорошо описываются моделью двухпериодического магнитодиэлектрического слоя с параметрами материала $|\epsilon| \gg 1$ и $\epsilon\mu \approx 1$. Следует также отметить, что с увеличением толщины слоя добротность системы в резонансе увеличивается, то есть полоса частот фильтра прохождения становится более узким.

Список литературы

1. Rubin, B., and H. Bertoni. "Reflection from a periodically perforated plane using a subsectional current approximation." *IEEE transactions on antennas and propagation* 31.6 (1983): 829-836.
2. Prosvirnin, S. L., et al. "Analysis of reflection and transmission of electromagnetic waves in complex layered arrays." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 14.6 (2000): 807-826.
3. Fano, Ugo. "The theory of anomalous diffraction gratings and of quasi-stationary waves on metallic surfaces (Sommerfeld's waves)." *JOSA* 31.3 (1941): 213-222.