УДК 621.396.677.8:004.942

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАННОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Зайко Е.И., Насонова Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, ravenr.nosignall@gmail.com

Аннотация: рассмотрена частотно-селективная поверхность (*ЧСП*) на основе периодического массива медных крестообразных элементов, нанесенных на диэлектрическую подложку с ε_r = 3.5 и толщиной 1 мм. Проведено электродинамическое моделирование фрагмента 10×10 элементов при нормальном падении плоской волны в диапазоне 4–18 ГГц. Исследовано влияние длины креста *L*, ширины полосы *w_Cu*, периода решётки *p* и толщины подложки *h* на частотные зависимости коэффициентов передачи *S21* и отражения *S11*. Показано, что увеличение длины креста смещает резонанс *S21* вниз по частоте, а ширина полосы и период определяют глубину резонанса. Полученные зависимости позволяют выбирать начальную геометрию резонансной *ЧСП* и могут быть использованы при разработке переключаемых метаповерхностей.

Ключевые слова: частотно-селективная поверхность, коэффициент передачи, крест, электродинамическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-селективные поверхности (*ЧСП*) применяются для управления прохождением и отражением электромагнитного излучения в заданных диапазонах частот. Одним из простых и технологичных вариантов *ЧСП* является периодическая поверхность из металлических элементов в форме креста, нанесенных на диэлектрическую подложку. Благодаря симметрии элемента его резонансные свойства слабо зависят от поляризации падающей волны, что упрощает проектирование и интегрирование в состав антенных систем.

Такая структура может использоваться как резонансная или полосно-заграждающая метаповерхность. Ее характеристики определяются формой элемента, размерами креста, периодом решетки, толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки. Варьируя эти параметры, можно целенаправленно смещать резонансную частоту и управлять шириной рабочей полосы, что важно при проектировании структур под конкретный диапазон.

Цель работы состоит в определении частотных характеристик *ЧСП* на основе периодического массива медных крестов и исследовании влияния геометрических параметров элементарной ячейки на коэффициенты передачи *S21* и отражения *S11* в диапазоне 4-18 ГГц.

Частотно-селективные поверхности представляют собой периодические металлические массивы, нанесенные на диэлектрическую подложку, которые избирательно пропускают или отражают электромагнитные волны в заданных диапазонах частот. Благодаря этому они широко применяются в радиопрозрачных укрытиях, дихроичных зеркалах, поглотителях и системах снижения радиолокационной заметности, а также в задачах электромагнитной защиты и экранирования. В качестве базовых элементов *ЧСП* чаще всего используют крестообразные и петлевые структуры, при этом крест обычно резонирует, когда его длина близка к половине длины волны, что делает такие элементы удобной основой для построения как полосно-пропускающих, так и полосно-заграждающих фильтров.

I. МОДЕЛЬ БАЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ

Базовая элементарная ячейка представляет собой медный крест (рисунок 1), сформированный двумя взаимно перпендикулярными прямоугольными полосами. Крест расположен на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью 3.5 и толщиной 1 мм.

Основные параметры ячейки: *p* – период по осям *x* и *y, L* – полная длина креста, *w_Cu* – ширина медной полосы, *t_Cu* – толщина медного слоя, *h* – толщина подложки, ε_r – диэлектрическая проницаемость подложки, *s* – зазор между крестами.

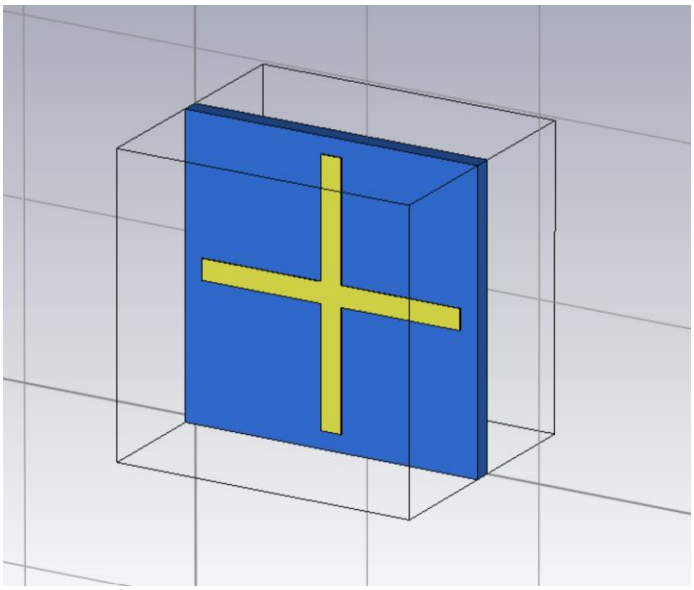


Рисунок 1. Модель крестообразного элемента ЧСП

В работе выполнялось электродинамическое моделирование конечного фрагмента частотно-селективной поверхности, состоящего из 10×10 крестообразных медных элементов, размещенных на диэлектрической подложке. Возбуждение задавалось нормально к поверхности, вдоль оси z, с регистрацией падающей, отраженной и прошедшей электромагнитных волн. По результатам расчёта определялись частотные зависимости коэффициентов S11(f) и S21(f) в диапазоне 4-18 ГГц, частота и глубина резонанса S21, ширина резонансной области и положение максимума отражения. Такой подход позволяет оценить резонансные свойства практически реализуемого фрагмента ЧСП конечного размера с учётом взаимной связи между элементами и влияния краевых участков.

II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

Крест можно рассматривать как дипольный ЧСП-резонатор. Для первой оценки резонансной частоты используется эффективная длина проводящего элемента.

$$L \approx 0.45 * (\Lambda_0/\sqrt{\varepsilon_{eff}}). \quad (1)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость для начальной оценки:

$$\varepsilon_{eff} \approx (1 + \varepsilon_r)/2. \quad (2)$$

При ε_r = 3.5 получаем $\varepsilon_{eff} \approx 2.25$, $\sqrt{\varepsilon_{eff}} \approx 1.5$.

Длина креста в миллиметрах может быть записана как:

$$L \approx 90/f_0, \quad (3)$$

Здесь f_0 задается в ГГц, а L является полной длиной креста от конца одного плеча до конца противоположного плеча.

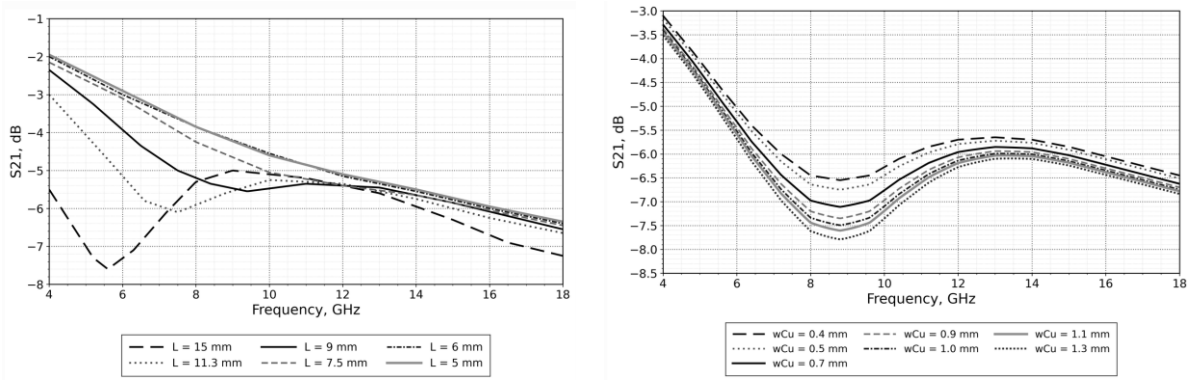
III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для электромагнитного моделирования исследуемой ЧСП параметры изменялись в диапазонах, приведенных в таблице 1.

Таблица 1. Параметры для моделирования

Целевой резонанс	*L*, мм	*w_Cu*, мм	*p*, мм
5.6 - 9.5 ГГц	15.0, 11.3, 9.0, 7.5, 6.0, 5.0	1.6	17.0
8.6 - 9 ГГц	9.0	0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 1.3	10.5
8.5 - 9.4 ГГц	9.0	1.0	6, 7, 8, 9, 10, 12, 14

Результаты исследования зависимостей частотных характеристик S21(f) от геометрических параметров частотно-селективной поверхности приведены на рисунках 2-3.



а б

Рисунок 2. Результаты моделирования *S21: а* – для значений *L* от 5 до 15 мм; *б – для значений w_Cu* от 0,4 до 1,3 мм

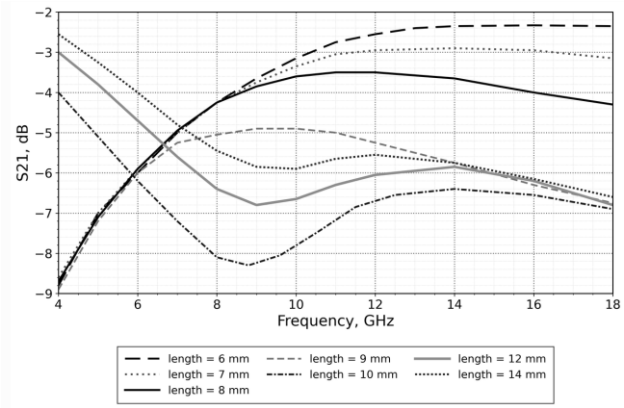


Рисунок 3. Результаты моделирования *S21* для различных значений *p*

Таблица 2. Влияние параметров ЧСП на частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения

Исследуемый параметр	Диапазон изменения	Влияние
Длина креста *L*	5-15 мм	Увеличение *L* смещает резонанс *S21* вниз по частоте
Ширина полосы *w_Cu*	0.35-1.8 мм	Влияет на глубину и ширину резонанса
Период p	*L*+1 ... *L*+3 мм	Влияет на связь между ячейками и угловую устойчивость

В результате моделирования получены частотные зависимости *S21(f)* и *S11(f)* для базовой геометрии. Показано, что положение резонанса *S21* в большей степени определяется полной длиной креста *L*, его глубина и ширина зависят от ширины медной полосы *w_Cu* и периода решетки *p*. Увеличение длины медного креста приводит к снижению резонансной частоты. Ширина полосы и период решетки должны влиять на добротность, глубину провала *S21* и форму зависимости *S11*: рост *w_Cu* расширяет проводящий элемент и увеличивает связь с подложкой, а увеличение периода *p* ослабляет взаимную связь между соседними крестами и сужает резонансную область. Смоделированные значения резонансных частот соответствуют целевым диапазонам. При изменении длины креста L резонансные частоты находятся в области 5.6-9.5 ГГц, для ширины полосы w_Cu – в диапазоне 8.6-9.0 ГГц, а для периода решётки p –8.5-9.4 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметрическое моделирование ЧСП на основе медных крестов позволило определить связь между геометрией элементарной ячейки и частотными характеристиками поверхности, что может использоваться для выбора начальной геометрии резонансной ЧСП и разработки переключаемых метаповерхностей, а также для разработки переключаемых и реконфигурируемых метаповерхностей СВЧ-диапазона.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках задания 4.1.20 ГПНИ «Современное материаловедение, перспективные материалы и новые технологии».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Costa, F. A Frequency Selective Radome with Wideband Absorbing Properties / F. Costa, A. Monorchio // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 2012. — Vol. 60, No. 6. — P. 2740–2747.

[2] An, Z. Frequency selective rasorber with high temperature resistance and mechanical bearing characteristics based on double-layer metasurface regulation / Z. An, T. Xu, Y. Li, R. Zhang, B. Zhang // Materials & Design. – 2025. – Vol. 254. – Art. no. 113991.

[3] Lv, J. Development of Energy-Selective Surface for Electromagnetic Protection / J. Lv, C. Luo, J. Zhao, H. Han, H. Lu, B. Zheng // Micromachines. – 2025. – Vol. 16, No. 5. – Art. no. 555. https://doi.org/10.3390/mi16050555.

[4] Anwar, R. S. Frequency Selective Surfaces: A Review / R. S. Anwar, L. Mao, H. Ning // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, No. 9. – Art. no. 1689. https://doi.org/10.3390/app8091689.

DESIGN OF A FREQUENCY-SELECTIVE SURFACE FOR MICROWAVE ATTENUATION IN A SPECIFIED FREQUENCY BAND

L.I. Zaiko, N.V. Nasonova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
ravenr.nosignall@gmail.com

Abstract: a frequency-selective surface based on a periodic array of copper cross-shaped elements printed on a dielectric substrate with ε_r = 3.5 and thickness of 1 mm is considered. Electromagnetic simulation of a 10×10 element fragment is performed in *CST Microwave Studio* under normal plane-wave incidence in the 4–18 GHz range. The influence of the cross length *L*, strip width *w_Cu*, lattice period p, and substrate thickness *h* on the frequency dependences of the transmission *S21* and reflection *S11* coefficients is studied. It is shown that increasing the cross length shifts the *S21* resonance to lower frequencies, while the strip width and period determine the *Q*-factor and the depth of the dip. The obtained dependences allow selecting the initial geometry of a resonant ЧСП and can be used in the development of switchable metasurfaces.

Keywords: frequency-selective surface, transmission coefficient, cross-shaped element, electromagnetic simulation.