

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-04>

УДК 537.874

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНА ПОВЕРХНЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ СКЛАДНОЇ ТОПОЛОГІЇ

Д.В. Майборода, С.О. Погарський

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4,
м. Харків, 61022, Україна

E-mail: spogarsky@gmail.com

Надійшла до редакції 7 квітня 2021 р.

Актуальність. Розв'язання специфічних задач в сучасній техніці НВЧ і КВЧ діапазонів таких як реалізація зниження радіолокаційної помітності об'єктів, просторових частотно-селективних фільтрів, рефлекторів вимагає розробки і створення особливого класу електродинамічних структур – частотно-селективних поверхонь. Завдяки унікальності їх електродинамічних характеристик вдається вирішити досить технічно складні завдання - режекції збуджуваних поверхневих хвиль, створення «заборонених» зон в амплітудно-частотних характеристиках.

Мета роботи. Чисельне моделювання та експериментальне дослідження електродинамічних характеристик площинних частотно-селективних поверхонь з щілинними елементами складної топології. Оцінка впливу геометричних параметрів щілинної неоднорідності і матеріальних констант діелектричної підкладки на коефіцієнти відбиття і проходження частотно-селективної поверхні.

Матеріали та методи. В роботі представлені результати чисельного моделювання електродинамічних характеристик комірки нескінченної 2D частотно-селективної поверхні з топологією структурного елемента Ψ -образного вигляду і експериментальних досліджень параметрів прототипу. Моделювання виконано в рамках методу скінченних елементів (МСЕ) з використанням програмного продукту ANSOFT HFSS / ANSYS. Вимірювання характеристик виконані у вільному просторі методом прямого виміру величин загасання.

Результати. В ході численних експериментів встановлено, що в структурі можливе виникнення двох видів резонансів, пов'язаних як із співвідношенням геометричних розмірів структурного елемента, так і з наявністю двостороннього екранування. Досліджено вплив товщини діелектричної підкладки і значень діелектричної проникності на коефіцієнти відбиття і проходження. Встановлено частотні залежності величини загасання при зміні просторової орієнтації структури щодо фронту падаючої хвилі. Експериментально встановлено залежність величини радіопрозорості двошарової частотно-селективної поверхні від кута обертання структури навколо заданої осі.

Висновки. Представлені результати чисельного моделювання електродинамічних характеристик комірки нескінченної 2D частотно-селективної поверхні з топологією структурного елемента Ψ -образного вигляду й експериментальні дослідження показали можливість просторової частотної селекції. Сукупність отриманих результатів дозволяє прогнозувати створення досить технологічних і високоефективних частотно-селективних поверхонь в мікрохвильовому діапазоні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: частотно-селективна поверхня, періодична структура, метод скінченних елементів, радіопрозорість

FREQUENCY SELECTIVE SURFACE WITH COMPLEX TOPOLOGY ELEMENTS

D. V. Mayboroda, S. A. Pogarsky

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance: The solution of specific problems in modern technology of microwave and UHF ranges, such as the implementation of reducing the radar signature of objects, spatial frequency-selective filters, reflectors requires the development and creation of a special class of electrodynamic structures - frequency-selective surfaces. Due to the uniqueness of their electrodynamic characteristics, it is possible to solve quite technically complex problems - suppression of excited surface waves, the creation of "forbidden" zones in the amplitude-frequency characteristics.

The purpose of the work is numerical modeling and experimental study of electrodynamic characteristics of plane frequency-selective surfaces with slotted elements of complex topology. Evaluation of the influence of the geometric parameters of the slot inhomogeneity and the material constants of the dielectric substrate on the reflection and transmission coefficients of the frequency-selective surface.

Materials and methods: The paper presents the results of numerical simulation of the electrodynamic characteristics of a cell of an infinite 2D frequency-selective surface with the topology of a structural element Ψ -shaped and experimental studies of the prototype parameters. Modeling was performed within the framework of the finite element method (FEM) using the ANSOFT HFSS / ANSYS software product. Characteristic measurements are performed in free space by direct measurement of attenuation values.

Results: In the course of numerical experiments, it was found that two types of resonances can arise in the structure, associated both with the ratio of the geometric dimensions of the structural element and with the presence of double-sided shielding. The influence of the thickness of the dielectric substrate and the values of the dielectric constant on the reflection and transmission coefficients is investigated. The frequency dependences of the reflection value are

established with a change in the spatial orientation of the structure relative to the incident wave front. The dependence of the magnitude of the radio transparency of a two-layer frequency-selective surface on the angle of rotation of the structure around a given axis has been established experimentally.

Conclusion: The presented results of numerical simulation of the electrodynamic characteristics of a cell of an infinite 2D frequency-selective surface with the topology of a structural element Ψ -shaped and experimental studies have shown the possibility of spatial frequency selection. The totality of the results obtained makes it possible to predict the creation of sufficiently technological and highly efficient frequency-selective surfaces in the microwave range.

KEYWORDS: frequency selective surface, periodic structure, finite element method, radio transparency.

ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ С ЭЛЕМЕНТАМИ СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИИ

Д.В.Майборода, С.А.Погарский

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4,
61022, г. Харьков, Украина

Актуальность. Решение специфических задач в современной технике СВЧ и КВЧ диапазонов таких как реализация снижения радиолокационной заметности объектов, пространственных частотно-селективных фильтров, рефлекторов требует разработки и создания особого класса электродинамических структур – частотно-селективных поверхностей. Благодаря уникальности их электродинамических характеристик удается решить достаточно технически сложные задачи – подавление возбуждаемых поверхностных волн, создание «запрещенных» зон в амплитудно-частотных характеристиках.

Цель работы. Численное моделирование и экспериментальное исследование электродинамических характеристик плоскостных частотно-селективных поверхностей с щелевыми элементами сложной топологии. Оценка влияния геометрических параметров щелевой неоднородности и материальных констант диэлектрической подложки на коэффициенты отражения и прохождения частотно-селективной поверхности.

Материалы и методы. В работе представлены результаты численного моделирования электродинамических характеристик ячейки бесконечной 2D частотно-селективной поверхности с топологией структурного элемента Ψ -образного вида и экспериментальных исследований параметров прототипа. Моделирование выполнено в рамках метода конечных элементов (МКЭ) с использованием программного продукта ANSOFT HFSS/ANSYS. Измерения характеристик выполнены в свободном пространстве методом прямого измерения величин затухания.

Результаты. В ходе численных экспериментов установлено, что в структуре возможно возникновение двух видов резонансов, связанных как с соотношением геометрических размеров структурного элемента, так и с наличием двустороннего экранирования. Исследовано влияние толщины диэлектрической подложки и значений диэлектрической проницаемости на коэффициенты отражения и прохождения. Установлены частотные зависимости величины затухания при изменении пространственной ориентации структуры относительно фронта падающей волны. Экспериментально установлена зависимость величины радиопрозрачности двухслойной частотно-селективной поверхности от угла вращения структуры вокруг заданной оси.

Выводы. Представленные результаты численного моделирования электродинамических характеристик ячейки бесконечной 2D частотно-селективной поверхности с топологией структурного элемента Ψ -образного вида и экспериментальные исследования показали возможность пространственной частотной селекции. Совокупность полученных результатов позволяет прогнозировать создание достаточно технологичных и высокоэффективных частотно-селективных поверхностей в микроволновом диапазоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: частотно-селективная поверхность, периодическая структура, метод конечных элементов, радиопрозрачность.

ВСТУП

Частотно-селективні поверхні (ЧСП) є електродинамічними об'єктами, які порівняно недавно привернули увагу дослідників і розробників функціональних елементів в НВЧ і КВЧ діапазонах. Підвищений інтерес обумовлений унікальністю властивостей функціональних елементів, в складі яких присутні ЧСП [1-5].

У найзагальнішому випадку ЧСП формують з використанням ідентичних елементів (як металевих, так і комбінованих), розташовуючи їх в одновимірних, двовимірних або тривимірних періодичних нескінченних масивах. В одновимірному і двовимірному варіантах ЧСП елементи масивів розташовуються на діелектричній підкладці, топологія одиночного елемента визначає частотну і поляризаційну характеристики.

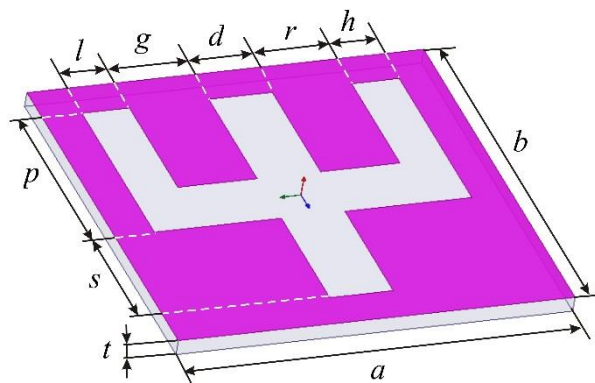
Очевидно, що найбільш перспективним напрямком практичного використання ЧСП є їх використання в аерокосмічній галузі. Серед найбільш важливих областей необхідно вказати наступні: реалізація так званої зниженої радіолокаційної помітності об'єктів (стелс-технології) [6]; створення частотно-селективних фільтрів (рефлекторів) [7], що дозволило істотно розширити функціональні можливості супутникових платформ. Особливим напрямком використання ЧСП є їх використання в області мікросмужкових (планарних) антен. Добре відомо, що одним з базових елементів в більшості конструкцій планарних антен є металевий екран. Рівнем випромінювання таких конструкцій можна

досить легко керувати шляхом використання в якості екрануючої площини не суцільну металеву поверхню, а ЧСП [8, 9]. Це дозволяє, з одного боку, істотно знизити рівень розсіювання енергії поза робочого діапазону, а, з іншого боку, використовуючи особливості амплітудно-частотних характеристик періодичних структур, керувати амплітудними і поляризаційними характеристиками антени. Додаткові можливості керування характеристиками площинних антен надають нові класи ЧСП. Так, поверхні типу HIS (High Impedance Surface) дозволяють зменшувати амплітуди поверхневих хвиль, що збуджуються (виступають в якості смуго-загороджувального фільтра) [10], а поверхні типу EBG (Electromagnetic Band-Gap) дозволяють створювати так звані "заборонені" зони в частотній області для електромагнітної хвилі, що поширюється в середовищі, яке містить періодичні неоднорідності [11]. Більш того, такі поверхні дозволяють інтегрувати в свій склад керовані напівпровідникові елементи, що відкриває додаткові можливості управління їх характеристиками.

Метою даної роботи є моделювання основних характеристик ЧСП з Ψ -подібною топологією базового елементу і експериментальне дослідження базових характеристик.

ДОСЛІДЖУВАНА СТРУКТУРА

Будемо розглядати двовимірну періодичну плоску структуру, елементарна комірка якої є щілинний елемент Ψ -образної топології, розміщений в металевому екрані. Схематичне зображення елементарної комірки представлено на Рис. 1. У Таблиці 1 представлені геометричні розміри елементів комірки.



Таблиця 1.

Параметр	Значення	Параметр	Значення
a	12.5 мм	g	2.5 мм
b	12.5 мм	d	2 мм
p	6 мм	r	2.5 мм
s	4 мм	h	1.5 мм
l	1.5 мм	t	var

Рис. 1. Схематичне зображення комірки
Fig. 1. Schematic representation of a cell

Всі розміри топологічних елементів комірки були фіксованими. Два параметра: товщина діелектричної підкладки t та її відносна діелектрична проникність ϵ_r є варіативними величинами.

Сама по собі топологія базового елементу структури є досить складною, з цієї причини всі функціональні залежності є багатопараметричними. Побудова строгого електродинамічного розв'язку є досить проблематичною і з цієї причини оптимальним слід визнати використання чисельних методів. В даному дослідженні був використаний метод скінчених елементів і його програмна реалізація у вигляді пакету ANSOFT HFSS [12]. Оскільки розглядається строго періодична двовимірною-нескінченна структура, то для аналізу її параметрів може бути використана теорема Флоке [13], яка в рамках пакету реалізується за допомогою так званого порту Флоке. Передбачається, що порт збуджує плоску хвилю. При цьому зміна кута падіння плоскої хвилі на елементарну комірку буде визначати фазовий зсув полів в сусідніх комірках.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Використання чисельних методів для аналізу характеристик складнокомпозиційних електродинамічних об'єктів надає унікальні можливості для візуалізації та аналізу електромагнітних полів в структурі (що дуже важко в випадках отриманих розв'язків з використанням чисельно-аналітичних методів, за винятком випадку отримання виразів для полів в замкнутій формі). На Рис. 2 представлені графічні зображення для електричного поля в ближній зоні для фіксованих значень $\epsilon_r = 2,2$ і $t = 0,5$ мм на фіксованій частоті $f = 8,37$ ГГц в разі нормального падіння плоскої хвилі (Рис.2а) і похилого падіння (кут 45° від нормалі - Рис.2б).

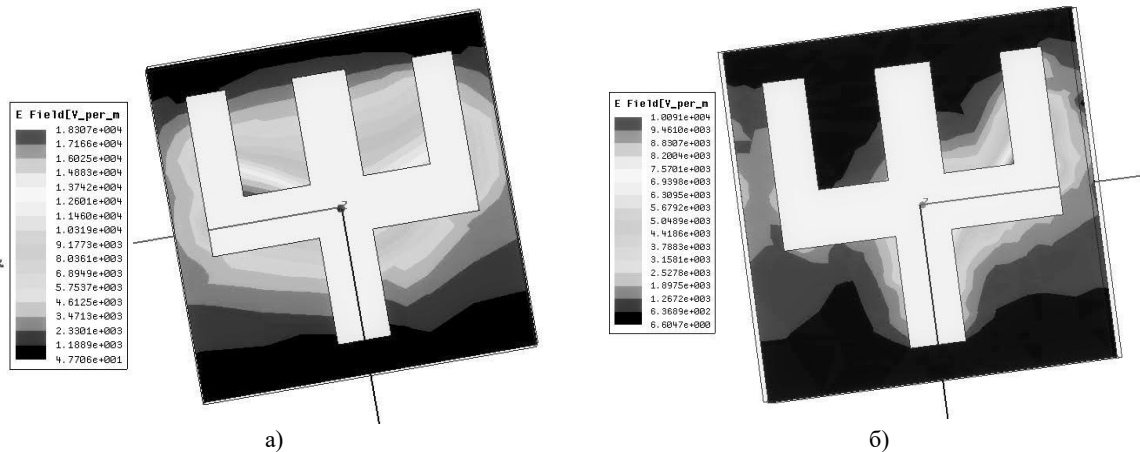


Рис. 2. Графічне представлення електричного поля на частоті $f = 8,37 \text{ ГГц}$,

$$\varepsilon_r = 2,2, t = 0,5 \text{ мм}$$

Fig. 2. Graphical representation of the electric field at frequency $f = 8,37 \text{ GHz}$,

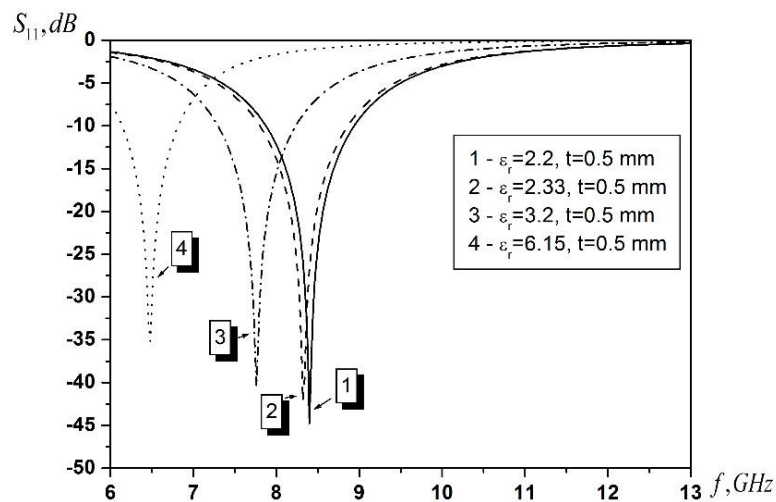
$$\varepsilon_r = 2,2, t = 0,5 \text{ мм}$$

Як очевидно, в разі нормального падіння збудження щільного елемента відбувається порівняно рівномірно. При цьому максимуми електричного поля спостерігаються поблизу центральної частини елемента. Винятком є один з елементів, розташований на периферійній частині, де амплітуда поля спадає приблизно в 10^3 разів. При похилому падінні центральна частина щільного елемента збуджується вкрай нерівномірно: поблизу одного з сегментів спостерігається абсолютний максимум поля. Це крайній сегмент, який «висвітлюється» фронтом падаючої хвилі по нормалі. При цьому діаметрально протилежний сегмент збуджується істотно менше (приблизно в $10^2 \dots 10^3$ разів на різних гранях сегмента).

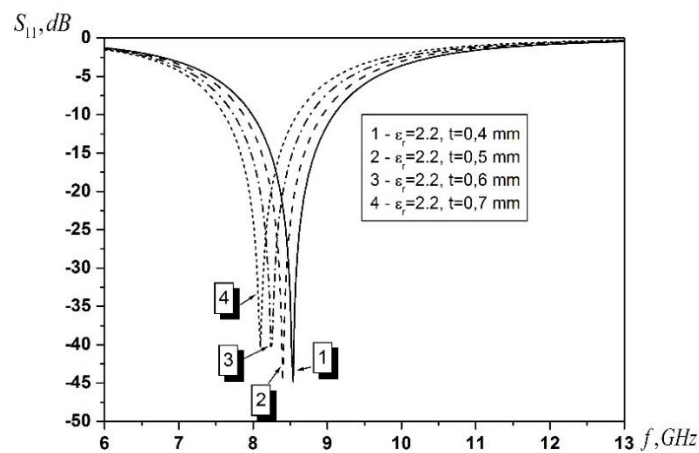
Як відомо, два базових параметра площинних структур, а саме товщина діелектричної підкладки і величина діелектричної проникності, мають визначальний вплив на частотні і енергетичні характеристики. З метою вивчення впливу цих параметрів на частотні характеристики було проведено моделювання залежності $|S_{11}|$ при фіксованому значенні товщини підкладки і варіації значення відносної діелектричної проникності. Величина товщини діелектричної підкладки була обрана $t = 0.5$ мм. Вибір такого значення ε_r , обумовлений тією обставиною, що при використанні так званих «тонких» підкладок істотно знижується ступінь збудження поверхневих хвиль в діелектричній підкладці. Таке значення t задовольняє вимогам «тонкої» підкладки. Справді, центральна частота розглянутого діапазону дорівнює приблизно 8.5 ГГц, що відповідає довжині хвилі 3.53 см, що істотно більше товщини підкладки.

На Рис. 3 представлені залежності $|S_{11}|$ при фіксованому значенні $t = 0.5$ мм і при варіації значень відносної діелектричної проникності ε_r від частоти. Величини обрані з ряду стандартних значень, які використовуються в цій частині сантиметрового діапазону. Залежності демонструють цілком передбачуваний характер. З ростом значень ε_r відбувається зміщення піків резонансних кривих в більш низькочастотну область розглянутого діапазону. Величина максимального зсуву становить $\Delta F \approx 1.93 \text{ ГГц}$. При цьому криві залишаються гладкими, крутизна фронтів і ширина резонансних кривих за рівнем -10 дБ принципово не змінюються. Однак, із зростанням значень ε_r відбувається зменшення рівня зворотних втрат.

Вплив величини товщини підкладки при фіксованому значенні ε_r демонструють залежності, представлені на Рис. 4. Тут представлені залежності модуля коефіцієнта відбиття $|S_{11}|$ від частоти при значенні $\varepsilon_r = 2.2$ і варіації величини товщини підкладки від 0.4 мм до 0.7 мм. Зміна товщини в цьому інтервалі призводить також до зсуву резонансної частоти поглинання в сторону нижніх частот приблизно на $\Delta F \approx 500 \text{ МГц}$. Всі криві носять гладкий характер з досить високим рівнем крутизни.

Рис. 3. Залежність $|S_{11}|$ від частоти при варіації значень ε_r , $t = 0.5$ ммFig. 3. Frequency dependence $|S_{11}|$ with variation of values ε_r , $t = 0.5$ mm

Якщо орієнтуватися на величину зворотних втрат -10 дБ (при рівні КСХН ≈ 2), ширина смуги узгодження становить 900 МГц. Для всіх залежностей рівень крутизни виявляється приблизно однаковим і досягає значення 0.038 дБ / МГц.

Рис. 4. Залежність $|S_{11}|$ від частоти при варіації значень t , $\varepsilon_r = 2.2$ Fig. 4. Frequency dependence $|S_{11}|$ with variation of values t , $\varepsilon_r = 2.2$

Крім коефіцієнта відбиття будь-якої ЧСП не менш важливою характеристикою є ступінь її прозорості (або коефіцієнт проходження $|S_{21}|$). На Рис. 5 наведено залежності $|S_{21}|$ комірки при фіксованому значенні $\varepsilon_r = 2.2$ і варіації значення товщини підкладки t в розглянутому діапазоні частот. Порівняльний аналіз залежностей, наведених на Рис. 4 і Рис. 5, вказує на певні особливості. Якщо залежності $|S_{11}|$ (Рис. 4) носять типовий яскраво виражений резонансний характер з досить високими значеннями зворотних втрат в точках резонансу, то залежності $|S_{21}|$ (Рис. 5) мають абсолютно «розмитий» вид. Так, ширина смуги, в межах якої прозорість поверхні не падає нижче значення -3 дБ становить понад 2.89 ГГц. З ростом частоти

прозорість поверхні істотно зменшується. Поблизу кінців частотного діапазону вона коливається в інтервалі -6 дБ ... -12 дБ.

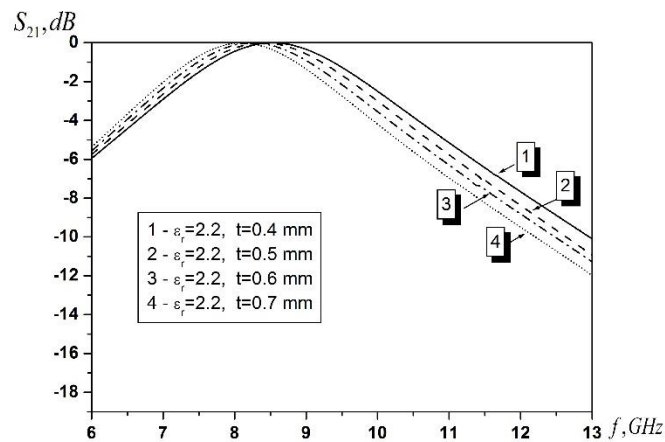


Рис. 5. Залежність $|S_{21}|$ від частоти при варіації значень t і $\epsilon_r = 2.2$

Fig. 5. Dependence $|S_{21}|$ on frequency with variation of values t and $\epsilon_r = 2.2$

При симетричному розміщенні на зворотній (вільній) стороні підкладки щілинного елемента з ідентичною топологією відбуваються істотні зміни в процесі взаємодії падаючої хвилі і елемента ЧСП. На Рис. 6 наведені залежності $|S_{11}|$ від частоти при фіксованій товщині підкладки і варіації значень ϵ_r . Аналіз залежностей вказує на більш складний і неоднозначний характер залежностей при зміні величин відносної діелектричної проникності.

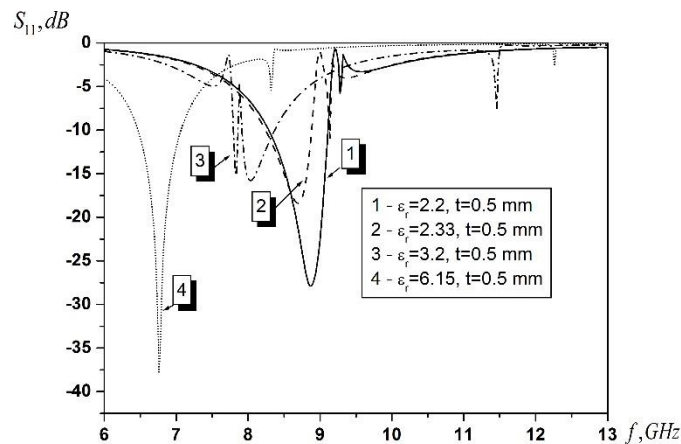


Рис. 6. Залежність $|S_{11}|$ двошарової структури від частоти при варіації значень ϵ_r , $t = 0.5$ мм

Fig. 6. Dependence $|S_{11}|$ of the two-layered structure on frequency with variation of values ϵ_r , $t = 0.5$ mm

При малих значеннях відносної діелектричної проникності $\epsilon_r = 2.2$ в структурі не виникає додаткових паразитних резонансів (або вони зовсім незначні). При збільшенні значень до 2.33 ... 3.2 резонансні явища істотно зростають. При значенні $\epsilon_r = 3.2$ істотні резонансні явища виявляються відразу в двох частотних діапазонах. Причому, в інтервалі частот від 7.45 до 8.73 ГГц вони виявляються істотними. При цьому величина зворотних втрат істотно знижується. Однак рівень узгодження залишається на прийнятному рівні (за винятком окремих частот). При подальшому збільшенні значення ϵ_r відбуваються помітні зміни в характеристиці. По-перше, максимум істотно зміщується в низькочастотну область

(більше, ніж на 2 ГГц). По-друге, істотно збільшується рівень зворотних втрат (з -15 ... -20 до -37 дБ). І, нарешті, спостережуваний рівень паразитних резонансів не перевищує -3 дБ.

Двошарове розміщення елементів структури призводить також до суттєвих змін в залежності $|S_{21}|$ від частоти при варіації значень ϵ_r . Відповідні залежності наведені на Рис. 7.

Порівняльний аналіз залежностей на Рис. 5 і Рис. 7 вказує на виникнення додаткових резонансів в структурі, обумовлених як резонансами між топологічними елементами, так і наявністю двошарового екранування. Про це свідчать стрибкоподібні зміни амплітуди $|S_{21}|$ поблизу певних частот. На цих же частотах відбувається стрибкоподібне зміна і фази коливань. При невеликих змінах значень відбувається порівняно невелике зміщення мінімумів коефіцієнтів проходження в низькочастотну область. Зсув не перевищує величини $\Delta F \approx 210$ МГц. При збільшенні значень в характеристиках превалюють резонанси, пов'язані з двошаровим екрануванням.

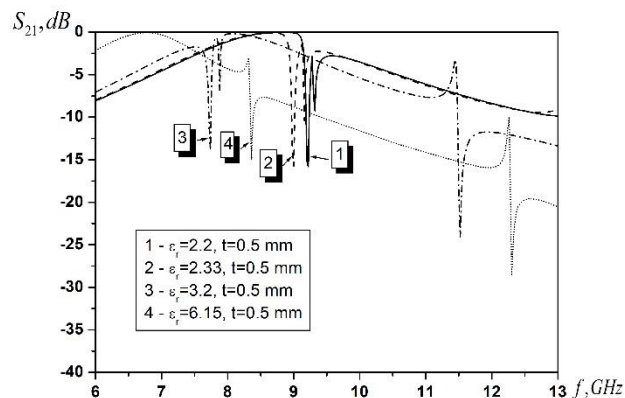


Рис. 7. Залежність $|S_{21}|$ двошарової структури від частоти при варіації значень ϵ_r і $t = 0.5$ мм

Fig. 7. Frequency dependence $|S_{21}|$ of the two-layer structure with variations in values ϵ_r and $t = 0.5$ mm

На Рис. 7 одна група розміщується в низькочастотній області, а друга група – в високочастотній області. При цьому з ростом частоти спостерігається істотне зниження прозорості структури (коефіцієнт $|S_{21}|$ досягає значень -23.86 ... -28.36 дБ). Смуги прозорості структури виявляються істотно зміщені один щодо одного, і вони виявляються істотно більш вузькими. Разом з тим, в характеристиках (при значеннях $\epsilon_r = 3.2$ і $\epsilon_r = 6.15$) спостерігаються досить широкі частотні області, в межах яких величина $|S_{21}|$ змінюється досить плавно (в смузі від 8.56 ГГц до 11.98 ГГц коефіцієнт $|S_{21}|$ змінюється в інтервалі від -7.4 дБ до -16 дБ).

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Для верифікації вірогідності отриманих ключових залежностей параметрів ЧСП була проведена серія фізичних експериментів. Для експериментальних досліджень було виготовлено два ідентичні прототипи ЧСП квадратної форми. Розмір сторони квадрата становив 125 мм. На поверхні розміщалися 10x10 щільних сегментів. Товщина діелектричної підкладки $t = 0,5$ мм, відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 2,2$. Вимірювання проводилися у вільному просторі методом прямого виміру величин загасання. Геометричні центри рупорів розташовувалися на одній лінії з геометричними центрами прототипів ЧСП, а відстань між рупорами становило 50 см, що достатньо у розглянутому частотному діапазоні для формування плоского фронту хвилі.

Процес вимірювань містив у собі два етапи. На першому етапі проводилися вимірювання величини загасання без ЧСП. Ці дані необхідні для калібрування всієї системи. На Рис. 8 представлена залежність величини загасання від частоти при відсутності ЧСП (а фактично це – коефіцієнт пропускання).

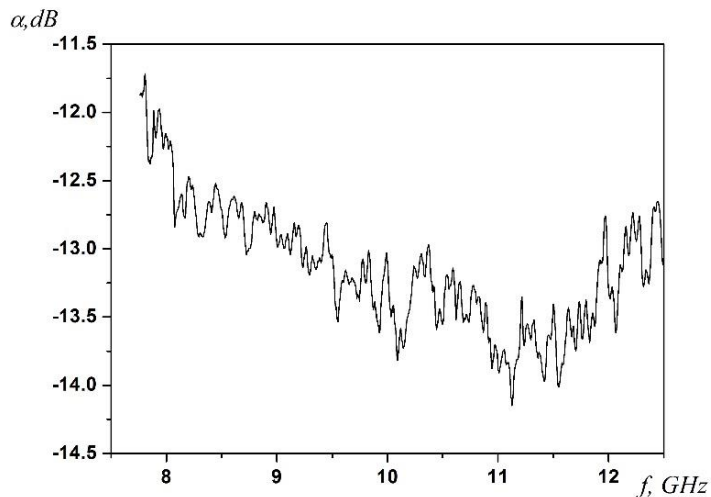


Рис. 8. Залежність загасання від частоти без ЧСП
Fig. 8. Dependence of attenuation on frequency without FSP

Як очевидно, залежність носить досить порізаний характер. Величина загасання коливається в інтервалі від -11,75 дБ до -14,1 дБ.

На другому етапі проводилися вимірювання загасання при наявності ЧСП. Досліджувалася двошарова ЧСП (діелектрик-метал із щілинними сегментами-діелектрик-метал із щілинними елементами) загальною товщиною структури $t = 1$ мм. Опромінення проводилося з боку діелектрика. При цьому ЧСП цілком могла обернутися щодо нормалі до структури. На Рис. 9 представлені залежності загасання від частоти залежно від кута повороту проти годинникової стрілки.

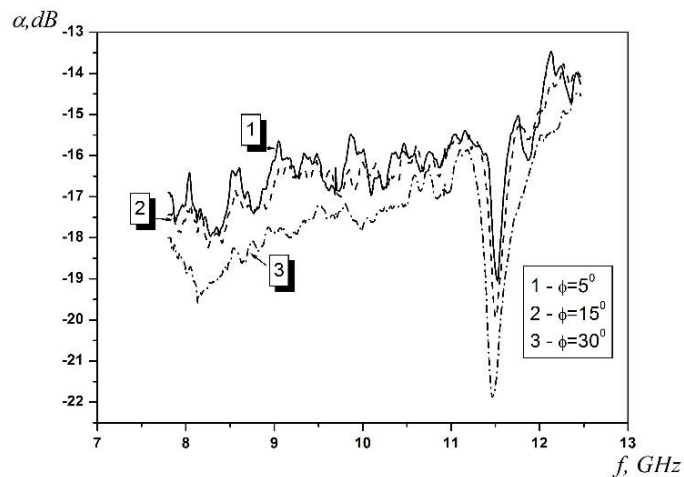


Рис. 9. Залежність загасання від частоти зі ЧСП від кута повороту проти годинникової стрілки
Fig. 9. Dependence of attenuation on frequency with FSS on the counterclockwise rotation angle

Аналіз представлених залежностей вказує на резонансний характер залежностей при будь-якому куті повороту. Однак, при невеликих значеннях (криві 1, 2) максимальні значення загасання досягають величин -19,75 дБ ... -20 дБ. При цьому резонанси виникають практично на одній частоті $f = 11,5$ ГГц. При збільшенні кута повороту до значення 30° (крива 3) помітно зменшується прозорість структури (збільшується середня величина загасання). Резонанс виявляється більш гострим, його частота зміщується в бік більш низьких частот $f = 11,47$ ГГц, а максимальне загасання в резонансі досягає значення -21,75

дБ. При порівнянні отриманих експериментальних залежностей з результатами чисельного моделювання (Рис. 7) можна говорити про повний збіг резонансних частот при незначних відмінностях в амплітудах. Ці відмінності проявляються через технологічні погрішності виготовлення прототипів ЧСП.

На Рис. 10 представлені залежності величини загасання від кута повороту поблизу резонансних частот.

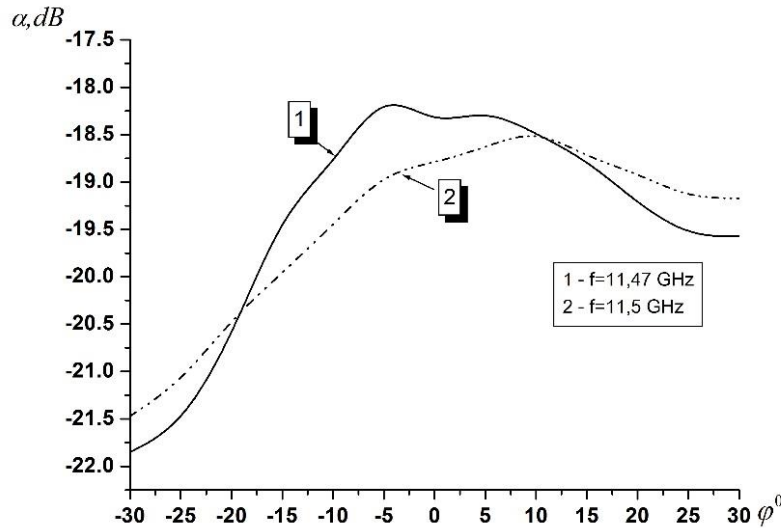


Рис. 10. Залежності загасання від кута повороту поблизу резонансних частот.
Fig. 10. Dependences of attenuation on the angle of rotation near resonant frequencies.

Обидві залежності носять досить плавний характер. Як очевидно, поблизу обох резонансних частот максимальне загасання спостерігається при досить великому куті повороту, відліченому проти годинникової стрілки (-30°). При повороті на той же кут, але за годинниковою стрілкою, також спостерігається максимальне загасання, але величина загасання приблизно на 3 дБ виявляється меншою. Можливою причиною таких відмінностей є фактор неточної фіксації структури.

ВИСНОВКИ

Таким чином, представлені результати чисельного моделювання електродинамічних характеристик нескінченної 2D комірки ЧСП із топологією структурного елемента у вигляді Ψ , експериментальні дослідження показали можливість просторової частотної селекції. Встановлено, що в структурі можливе виникнення двох видів резонансів, зв'язаних як співвідношенням геометричних розмірів структурного елемента, так і з наявністю двошарового екранування. Досліджений вплив товщини діелектричної підкладки й значень діелектричної проникності на коефіцієнти відбиття й проходження. Встановлені залежності величини загасання при зміні просторової орієнтації структури щодо фронту падаючої хвилі. Сукупність отриманих результатів дозволяє прогнозувати створення достатньо технологічних і високоефективних частотно-селективних поверхонь у мікрохвильовому діапазоні.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

ПОДЯКА

Дана робота виконана в рамках науково-дослідної роботи, яка фінансується за рахунок коштів державного бюджету Міністерством освіти і науки України (номер бюджетної теми 0119U002535).

Authors' ORCID ID

D. Mayboroda
S. Pogarsky



<https://orcid.org/0000-0002-9564-2369>
<https://orcid.org/0000-0003-0833-1421>

REFERENCES

1. Ghosh S. An equivalent circuit model of FSS-based metamaterial absorber using coupled line theory. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2014;14: 511–514. <http://dx.doi.org/10.1109/LAWP.2014.2369732>

2. Ghosh S. Broadband polarization-insensitive tunable frequency selective surface for wideband shielding. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2018; 60(1): 166–172. <http://dx.doi.org/10.1109/TEM.2017.2706359>
3. Munk B. Frequency selective surfaces. Theory and design. NY, USA: John Wiley & Sons Inc.; 2000; 410.
4. Narayan S, Sangeetha B, Jha R. Frequency selective surfaces based high performance microstrip antenna. London: Springer Singapore Heidelberg New York Dordrecht; 2016; 45. https://doi.org/10.1007/978-981-287-775-8_1
5. Li H, Cao Q, Wang Y. A Novel 2-B Multifunctional Active Frequency Selective Surface for LTE-2.1 GHz. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017; 65(6): 3084–3092. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2688927>
6. Heppenheimer T. A. Stealth: First glimpses of the invisible aircraft now under construction. Popular Science. 1986. Vol. 229 (3): 74-79, 115-116.
7. Ma Y, Wu W, Yuan Y, Zhang X, Yuan N. A wideband FSS based on vias for communication systems. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018; 17(12): 2517–2520. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2880219>
8. Adlina M, Maisarah A. Performances of Flexibel Antenna with Ultra-Thin AMC and AMC with Multi-Layer FSS. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST). 2018: 1–4. <https://doi.org/DOI:10.1109/ICEAST.2018.8434453>
9. Rahmati B, Hassani H. Multi-Band Metallic Frequency Selective Surface with Wide Range of Band Ratio. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015; 63(8): 3747–3753. <https://doi.org/DOI:10.1109/TAP.2015.2438340>
10. Wei Xing-Chang, Shu Yu-Fei, Zhang Jian-Bo, Wang Dong. Applications of high impedance surfaces for surface wave elimination. URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), 2016: 16408579. <https://doi.org/10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601333>
11. Azad Mohammed Z., Ali Mohammad. Novel Wideband Directional Dipole Antenna on a Mushroom Like EBG Structure. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2008; 56(5): 1242-1250. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.922673>
12. Ansoft HFSS /ANSYS Academic Research HF (5 tasks): 1 task(s) Permanent with TECS expiring 01-May-2020 Customer # 1076710.
13. Brillouin L. Wave Propagation in Periodic Structures, Electric Filters and Crystal Lattices. New York and London, 1946, p. 247
14. Mayboroda D.V., Pogarsky S.A. Simulation of Parameters of Frequency Selective Surface in Microwave Band. XI International Scientific Conference “Functional Basis of Nanoelectronics”, Odesa, Ukraine, 2020: 99-101.