

ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ ІМ. О.Я.УСИКОВА  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису  
УДК 537.874.6

ЯЧИН Володимир Васильович



ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА  
ДВОМІРНИХ МАГНІТОДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРІОДИЧНИХ  
СТРУКТУРАХ

01.04.03 - радіофізика

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1997

Дисертацією є рукопис.  
Робота виконана в Радіоастр  
академії наук України.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00750927 (U)

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,  
професор Хижняк Микола Антонович

Офіційні опоненти - доктор фіз.-мат. наук, ст.н.с., зав.відділом  
ІРЕ НАН України Масалов Сергій Олександрович;  
- доктор технічних наук, ст.н.с. ХВУ,  
професор Сухаревський Олег Ілліч .

Провідна організація - Харківський державний університет,  
кафедра теоретичної радіофізики

Захист дисертації відбудеться 25 червня 1997р. в 16 годин на  
засіданні спеціалізованої ради Д 02.29.01 в Інституті радіофізики та  
електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України за адресою: 310085, Україна,  
м.Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ІРЕ НАНУ; 310085,  
Україна, м.Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

Автореферат розіслано 21 травня 1997р.

Вчений секретар спеціалізованої ради

С.М.Харківський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Періодичні середовища характеризуються універсальними фізичними властивостями, завдяки яким і знайшли широке застосування в різних технічних галузях життєдіяльності людини.

Радіофізичний аспект використання періодичних структур визначається, в основному, їх дифракційними характеристиками. Ці пристрої застосовуються, наприклад, в лазерній техніці в ролі розподіленого бреггівського дзеркала напівпровідникового лазера; в лазерах з розподіленим зворотнім зв'язком тощо; в інтегральній оптиці як направлені відгалуджувачі, оптичні змішувачі та ін.; в антенній техніці знаходять численні застосування як селективні поверхні, різного роду екрани, антени облічники тощо; в акустооптиці як модулятори світла, перестроювані фільтри, аналізатори спектру, дефлектори та ін. Відоме також і те важливе значення, яке відіграють періодичні пристрої у фізичній електроніці й прискорюваній техніці. В основі перелічених застосувань лежить всебічне вивчення розсіяння електромагнітних хвиль на періодичних структурах з різноманітною геометрією періоду та різними характеристиками речовини, з якої утворена подана структура.

Зараз у теорії дифракції на перший план висуваються чіткі методи розв'язання задач, які містять у постановці мінімальне число обмежень і які опираються на широкі можливості сучасної обчислювальної техніки. Існує велика кількість таких методів, наприклад, метод полуобернення, Вінера-Хопфа-Фока та ін. Величезний внесок у ці дослідження зроблений харківською школою радіофізиків. Ці напіваналітичні методи завжди орієнтуються на врахування конкретних особливостей геометрії розсіювачів. У зв'язку з цим стає актуальною задача створення чіткого чисельно-аналітичного методу, який дає змогу вираховувати характеристики розсіювання будь-якого виду (довільні матеріальні параметри заповнення і геометрія періоду) періодичної двомірної структури у резонансному, враховуючи довгохвильовий, діапазоні довжин хвиль.

**Мета роботи.** Створення чіткого чисельно-аналітичного методу розв'язання задач розсіювання електромагнітних хвиль на двомірних періодичних структурах, вільного від обмежень на матеріальні і геометричні параметри періодичної структури в резонансному (враховуючи довгохвильовий) діапазоні хвиль падаючого поля.

ЛІТЬ ІМ. В. СТЕПАНОВА  
АН УкрАД

### **Задачі дослідження:**

1. Побудова на основі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки нового методу дослідження розсіювання електромагнітних хвиль на двовірних магнітодіелектричних періодичних структурах.

2. Дослідження на основі чисельного експерименту можливості апроксимації ідеально-металевої періодичної структури магнітодіелектричною з тією ж геометрією періоду.

3. Вияв нових ефектів розсіювання електромагнітних хвиль на магнітодіелектричних періодичних структурах (МПС).

4. Знаходження аналітичних формул для коефіцієнтів проходження (відбиття) електромагнітних хвиль при їх розсіюванні на МПС у довгохвильовому діапазоні.

5. Чисельний аналіз характеристик розсіювання МПС у резонансному діапазоні хвиль, порівняння отриманих даних із уже відомими в літературі.

**Методи дослідження.** У роботі використовуються результати і методи математичної фізики, теорії операторів, дифракції, інтегральних і диференційних рівнянь, лінійної алгебри, функцій комплексної змінної, електродинаміки. Значне місце займають обчислювальні методи, програмування яких виконане з використанням прикладних пакетів програм для персональних ЕОМ.

### **Наукова новизна роботи.**

1. Надано математично обґрунтований метод дослідження характеристик розсіювання електромагнітних хвиль на двовірних МПС з довільною конфігурацією періоду та довільними електромагнітними характеристиками.

2. Досліджено питання переходу магнітодіелектрик - метал при розсіюванні електромагнітних хвиль на двовірних МПС.

3. Виявлено цілком нові ефекти, пов'язані з розсіюванням електромагнітних хвиль на МПС.

4. Знайдено аналітичні формули для коефіцієнтів відбиття (проходження) електромагнітних хвиль при розсіюванні на МПС у довгохвильовому діапазоні.

5. Розроблено універсальні чисельні алгоритми знаходження характеристик розсіювання електромагнітних хвиль на МПС. Подані численні приклади розрахунку коефіцієнтів проходження (відбиття) як функцій параметрів падаючого поля для конкретного виду МПС.

**Обґрунтованість та вірогідність** основних положень результатів та висновків, отриманих в роботі, зумовлені: використанням у ролі вихідних інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки (принциповим їх достоїнством є те, що вони містять в собі всі граничні умови, враховують розсіюючий ефект всього об'єму середовища, рішення за допомогою їх задовольняють умовам випромінювання на безмежності); перевіркою виконання закону збереження енергії, а також збіжністю розв'язання при збільшенні кількості врахованих нерозповсюджених просторових гармонік; збігом результатів розв'язання, отриманих за допомогою розробленого методу з результатами рішень, відомих з літератури.

**Практична цінність роботи** визначається тим, що розроблений метод може впроваджуватись як інструмент аналізу характеристик розсіювання двомірних МПС з метою подальшого застосування отриманих даних у розробці НВЧ-приладів, які використовують як базовий елемент періодичну структуру. Отримані результати розкривають природу взаємодії електромагнітного випромінювання з періодичними середовищами як такими і можуть бути корисними також у поточній практиці приладобудування в галузі електроніки і акустики.

**Публікації.** Основні наукові результати і висновки дисертації викладено в семи публікаціях, з них - три статті у реферованих журналах і чотири публікації в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Особистий внесок дисертанта** в опублікованих роботах, співавтором яких він є, такий: у роботах [1,4,5] алгоритм розрахунку характеристик розсіювання магнітодіелектричних прямокутних ґраток, методика переходу магнітодіелектрик - метал у резонансному діапазоні довжин хвиль, чисельний експеримент; у роботах [2,6,7] ідея розгляду розсіювання електромагнітних хвиль на магнітодіелектричному шарі, алгоритм розрахунків в резонансному діапазоні довжин хвиль, аналітичні формули для характеристик розсіювання шару в довгохвильовому діапазоні, чисельний експеримент, теоретичне виявлення ефектів розсіювання на конкретного виду періодичному шарі; в [3] ідея можливості представлення будь-якої МПС зі скалярними функціями  $\varepsilon(x,z), \mu(x,z)$  сукупністю магнітодіелектричних періодичних шарів, алгоритм розрахунку для розсіювання хвиль у резонансному діапазоні, аналітичні формули для характеристик розсіювання МПС у довгохвильовому діапазоні.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародному симпозиумі "Progress in Elect-

romagnetic Research Symposium" (PIERS-91, Кембридж, 1991р.), міжнародній конференції "Математические методы в электромагнитной теории" (Алушта, 1991р.), міжнародному харківському симпозиумі "Физика и техника мм и субмм волн" (Харків, 1994р.), міжнародній конференції "Математические методы в электромагнитной теории" (Харків, 1994р.), на засіданнях Вченої ради РІ НАН України (Харків, 1991-1996рр.), на тематичних семінарах з питань застосування інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки, що проводяться у ХТУРЕ (Харків, 1996р.).

#### Основні положення, що виносяться на захист:

1. Метод дослідження розсіювання електромагнітних хвиль на МПС з довільною геометрією періоду і будь-якими скалярними функціями  $\epsilon$  та  $\mu$  періоду.

2. Методика переходу при розсіюванні в резонансному діапазоні довжин хвиль від МПС з довільними  $\epsilon$  та  $\mu$  до ідеально металевих періодичних структур з тією ж формою періоду.

3. Виявлення ефекту зміщення по частоті максимуму коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль при зміні положення ґраток відносно одне одного при розсіюванні Е-поляризованих хвиль на вкладених прямокутних діелектричних ґратках.

4. Виявлення ефекту руху максимуму коефіцієнта проходження по кутовій шкалі при зміні глибини модуляції шару при теоретичному дослідженні характеристик розсіювання Е-поляризованої хвилі на періодично модульованому діелектричному шарі.

5. Виявлення ефекту Маложинця, який у випадку частих МПС проявляється і при розсіюванні Е-поляризованих хвиль.

6. Аналітичні формули для знаходження коефіцієнтів відбиття і проходження при розсіюванні електромагнітних хвиль на МПС з будь-якою конфігурацією періоду в довгохвильовому діапазоні.

7. Алгоритми розрахунку коефіцієнтів проходження і відбиття від МПС з довільною конфігурацією періоду при розсіюванні ними електромагнітних хвиль в довгохвильовому діапазоні.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків та списку літератури (118 найменувань). Повний обсяг дисертації складає 138 сторінок. Основний арукований текст складає 100 сторінок. У дисертації є 22 рисунки.

#### **ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі дається обґрунтування актуальності запропонованої теми, сформульовано мету і завдання дослідження, наводиться стис-

лий зміст роботи, а також основні положення, що виносяться на захист. Зроблено огляд вітчизняної та закордонної літератури, який дозволяє охарактеризувати стан проблеми на сучасному етапі розвитку науки в цій галузі, обговорюються методи і способи дослідження розсіювання на періодичних структурах.

У першому розділі представлено розв'язання задачі розсіювання електромагнітних хвиль на ґратках з магнітодіелектричних прямокутних брусів (рис.1). Ця задача є ключовою, оскільки припускає узагальнення на одномірнопериодичні магнітодіелектричні структури.

За вихідні рівняння взято інтегральні рівняння макроскопічної електродинаміки, які дозволяють врахувати як комплексну діелектричну, так і комплексну магнітну проникність об'єктів, що взаємодіють з електромагнітним полем:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) + (grad\text{div} + k^2)\vec{\Pi}^e - ik\mu_0\sigma\vec{\Pi}^m, \quad (1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0(\vec{r}) + (grad\text{div} + k^2)\vec{\Pi}^m + ik\mu_0\sigma\vec{\Pi}^e, \quad (2)$$

де

$$\vec{\Pi}^e = \frac{1}{4\pi} \int_V (\varepsilon(\vec{r}') - 1) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}',$$

$$\vec{\Pi}^m = \frac{1}{4\pi} \int_V (\mu(\vec{r}') - 1) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}',$$

$$f(|\vec{r} - \vec{r}'|) = \frac{\exp\{ik[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}\}}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}},$$

$\mu(\vec{r}')$ ,  $\varepsilon(\vec{r}')$  - відповідно магнітна і діелектрична проникність структури,  $V$  - об'єм розсіюючого середовища,  $\vec{E}_0(\vec{r}')$ ,  $\vec{H}_0(\vec{r}')$  - вектори електричної і магнітної напруженості падаючого поля,  $\vec{\Pi}^e$ ,  $\vec{\Pi}^m$  - потенціали Герца.

Розв'язання поставленої проблеми пов'язане із знаходженням явного виду для електричного і магнітного потенціалів Герца  $\vec{\Pi}^e$ ,  $\vec{\Pi}^m$ . Слід зауважити, що якщо точка опостереження  $\vec{r}$  знаходиться всередині об'єму  $V$ , співвідношення (1-2) перетворюються в інтегральні рівняння, оскільки шукані поля ліворуч ті ж, що й поля, які містяться в інтегральних доданках. Розв'язавши інтегральні рівняння, можна за відомим внутрішнім полем виразити поле поза структурою. Ці рівняння мають єдине розв'язання. Для аналізованого класу періодичних структур достатньо знайти рішення для будь-якої однієї поляризації. Так, розсіяння Н-поляризованої хвилі описується групою

інтегральних співвідношень з (1) і (2) для  $E_x, H_y, E_z$ ; розсіяння Е-поляризованої хвилі - групою співвідношень для  $E_x, H_y, E_z$ . З (1-2) витікає, що, отримавши рішення для однієї поляризації та, здійснюючи формальну заміну Н-компонент на Е-компоненти, відповідно й  $\varepsilon$  на  $\mu$ ,  $\mu$  на  $\varepsilon$ ,  $k$  на  $-k$ , автоматично отримуємо рішення і для іншої.

У загальному випадку побудова рішення вихідної системи інтегральних рівнянь являє собою достатньо складне завдання. У випадку ж розсіяння хвиль на періодичних структурах це завдання суттєво спрощується. Використовуючи функцію Гріна  $f$  у вигляді інтегрального розкладу по плоским хвилям:

$$f = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\omega(x-x') + i|k-\varepsilon|\sqrt{k^2-\omega^2}}}{\sqrt{k^2-\omega^2}} d\omega,$$

а також умову Флоке для періодичних середовищ:

$$\vec{H}, \vec{E}(x+L, z) = \vec{H}, \vec{E}(x, z) e^{ik_x L}$$

можна записати потенціали Герца як суму певних інтегральних функціоналів такого виду:

$$\vec{\Gamma}^m = \sum_{s=-\infty}^{\infty} e^{is\psi_s} z_s^{-1} \int_0^h G_y e^{i|k-\varepsilon|z_s} dz', \quad (3)$$

де

$$G_y = \frac{1}{L} \int_0^L H_y(x', z) e^{-ix'\psi_s} dx', \quad \chi_s = \sqrt{k^2 - \psi_s^2}, \quad \psi_s = k_x + \frac{2\pi}{L} s.$$

Вид для електричного потенціалу Герца буде аналогічним.

Збіжність інтегралів у всіх точках області інтегрування забезпечується логарифмічною особливістю функції  $f(|\vec{\rho} - \vec{\rho}'|)$  навколо точок  $\vec{\rho} = \vec{\rho}'$ .

Операція диференціювання по координаті  $x$  стає еквівалентною операції множення на постійну розповсюдження  $\psi_s$ .

Таким шляхом ми приходимо до інтегродиференційних рівнянь, де в лівій частині стоїть компонента поля, а в правій - суми, що містять інтегральні функціонали, які диференціюються по  $z$ -й координаті. Щоб розв'язати дану систему, треба здійснити перехід від інтегродиференційних рівнянь відносно поля до диференційних

рівнянь відносно інтегральних функціоналів. Цей перехід реалізується дією на ліву та праву частину інтегродиференційних рівнянь обмеженого оператора:

$$\hat{A}_j = \int_{2\pi/L}^{2\pi(j+1)/L} d\alpha e^{i\alpha x} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{L} \int_{nl}^{nl+a} dx' e^{i\alpha x'} \quad (4)$$

Після дії оператора ми отримуємо систему лінійних диференційних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами відносно функціоналів, розв'язання якої у математиці добре вивчене й не викликає особливих труднощів.

Розв'язавши отриману систему і використавши на заключному етапі принцип погашення як еквівалент граничних умов у традиційній постановці, ми переходимо до розв'язання нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно амплітуд просторових гармонік відомими чисельними методами. Побудувавши таким чином розв'язання для інтегральних функціоналів, ми знайдемо явні вирази для потенціалів Герца, а через них - вирази для розсіяних полів.

Подальший розгляд особливостей вихідних інтегральних рівнянь (1-2) дозволяє отримати розв'язання зовнішньої красвої задачі електродинаміки для ідеальнопровідного розсіюючого тіла за відомим розв'язанням відповідної красвої задачі для матеріального тіла із заданими геометрією і проникністю  $\epsilon$  та  $\mu$ . Дійсно, щоб із відомого розв'язання красвої задачі для матеріального тіла із заданими геометрією і проникностями  $\epsilon$  і  $\mu$  отримати розв'язання відповідної красвої задачі тієї ж геометрії, необхідно для області зовні ідеальнопровідного розсіюючого тіла здійснити граничний перехід:

$$|\epsilon| \rightarrow \infty, \mu \rightarrow 0, \epsilon\mu = \text{const.}$$

Цей момент застосовується у дисертаційній роботі повсюдно, де здійснюється перехід магнітодіелектрик - метал.

У заключному пункті першого параграфу проаналізовано розв'язання для довгохвильового діапазону. Отримані аналітичні вирази для компонент полів, розсіяних частими періодичними ґратками з магнітодіелектричних прямокутних брусів. Для таких структур має місце однохвильовий режим розсіювання, для якого проведено дослідження залежностей модулів коефіцієнтів відбиття і проходження як функцій параметрів цих структур, частотного параметра і кутів падіння поля. Установлено, що повна прозорість ґраток може

носити резонансний і нерезонансний (ефект Малюжинця) характеру. Отримано аналітичні вирази, які повністю описують ці явища, встановлено умови їх існування.

Комп'ютерна програма, яка побудована на основі даного методу, дозволила з великою точністю обчислити електродинамічні характеристики магнітодіелектричних ґраток при порівняно малих витратах машинного часу. Проведено дослідження залежностей коефіцієнтів проходження від параметрів ґраток і частотного параметра падаючого поля. Установлено, що врахування магнітної проникності матеріалу ґраток веде до нових якісних результатів для досліджень, пов'язаних з розглядом магнітодіелектричних ґраток, а також ґраток, які наближуються за своїми якостями до металевих.

Розрахунки проводились на ЕОМ - IBM-386 з точністю до 0.5% за алгоритмом методу, який репрезентовано у поданій главі. Проведено порівняння графіків залежності модуля коефіцієнта проходження  $E(H)$ -поляризованої хвилі конкретного виду ґраток від відношення її періоду до довжини хвилі падаючого поля з відповідними графіками, побудованими за методом часткового обернення оператора. З графічною точністю встановлено їх співпадіння.

У другому розділі наведені результати розв'язання задачі розсіяння хвиль на магнітодіелектричному періодичному шарі (рис. 1). Розв'язання являє собою узагальнення вже отриманого розв'язання для магнітодіелектричних ґраток.

Періодичну структуру, розсіяння на якій досліджується у поданій главі, можна розглядати як структуру, період якої сформований із щільно укладених магнітодіелектричних брусів. Також, як і у першій главі, розв'язання будується на базі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки (1-2), де поле записується для кожного сегменту періоду.

Враховуючи геометрію розсіюючої структури, вигляд інтегрального оператора буде таким:

$$\hat{A}_j^{(i)} = \int_{2\pi/L}^{2\pi(j+1)/L} d\mathbf{v} e^{i\mathbf{v}\cdot\mathbf{r}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{L} \int_{nL+q}^{nL+q+1} d\mathbf{x}' e^{i\mathbf{v}\cdot\mathbf{x}'} \quad (5)$$

Після дії оператора ми одержуємо рівняння для функціоналів поля кожного сегмента шару. Просумувавши кожне з цих рівнянь по  $i$ , де  $i$  - номер сегменту шару, отримуємо вирази, які пов'язують функціонали поля для кожного сегмента шару:

$$\begin{aligned}
 C_{x,z}^{\alpha}(\psi_n, z) &= \frac{\varepsilon_1 - 1}{L} \int_a^{a+1} e^{-i\tau \psi_n} E_{x,z}(\tau', z) d\tau', \\
 G_y^{\alpha}(\psi_n, z) &= \frac{\mu_1 - 1}{L} \int_a^{a+1} e^{-i\tau \psi_n} H_y(\tau', z) d\tau'.
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

У результаті, виразивши функціонали сегментів шарів через функціонали будь-якого певного сегмента, отримуємо рівняння для функціоналів поля одного сегмента шару. В подальшому розв'язання повністю відповідає вже наведеному для магнітодіелектричних ґраток.

Використовуючи комп'ютерну програму, побудовану на основі викладеного методу, ми провели чисельні дослідження розсіювання хвиль на деяких типах періодичних магнітодіелектричних шарів. Наприклад, досліджено випадок розсіювання електромагнітних хвиль на чотирьохсегментному магнітодіелектричному шарі, в якому  $\varepsilon$  і  $\mu$  другого і четвертого сегментів вважались рівними одиниці. Таким чином, досліджувалась модель вкладених ґраток з наступним вивченням впливу взаємного розташування ґраток відносно одне одного на дифракційні властивості системи. Одним з аспектів такого розгляду є вивчення зміщення дифракційних резонансів при зсуві ґраток. На рис.2 ясно видно зміщення максимуму коефіцієнта проходження, відзначеного стрілкою, при зміні розташування ґраток відносно одне одного.

Якщо кількість сегментів шару на рис.1 спрямувати до нескінченності і ширину сегмента, відповідно, до нуля, так, щоб величини  $\varepsilon$  і  $\mu$  змінювались плавно у межах періоду, то таку матеріальну субстанцію, в якій  $\varepsilon$  і  $\mu$  змінюються плавно на відстанях порядку довжини хвилі, прийнято називати градієнтною. Як приклад було проведено дослідження характеристик розсіювання модульованого шару із значенням діелектричної проникності, рівній діелектричній проникності  $TiO_2$  (рутіл) в міліметровому діапазоні довжин хвиль. На рис.3 наведені криві поведінки коефіцієнта проходження як функції кута падіння поля при різній глибині модуляції шару. На графіковій можна бачити цілковито новий ефект, пов'язаний із зміщенням максимуму коефіцієнта проходження в залежності від глибини модуляції  $\varepsilon$  шару. Закон зміни  $\varepsilon$  має такий вигляд:  $\varepsilon = 69 - A \cos(2x\pi/L)$ .

Для перевірки правильності остаточних алгоритмів розв'язання задачі розсіювання хвиль на багатосегментній періодичній структурі були порівняні характеристики розсіювання двосегментного діелектричного шару (E-поляризація) і чотирьохсегментних металевих

граток (H-поляризація), отримані репрезентованим у главі методом, з даними, відомими з літератури. Відмічається повна графічна збіжність результатів.

У третьому розділі побудовано розв'язання задачі розсіяння на магнітодіелектричних періодичних структурах складного профілю. Третій розділ є синтезуючою частиною перших двох розділів. Щоб отримати розв'язання задачі розсіювання на МПС з довільною конфігурацією періоду, структура представлялася сукупністю щільно пригнаних один до одного періодичних шарів (рис.1). Кожний шар такої структури сегментувався однаковим чином з різними  $\epsilon$  і  $\mu$  сегментів. Розв'язання будувалося на базі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки, використовуючи граничні умови у формі принципу погашення і вираження для функціоналів поля, представлених у другому розділі для магнітодіелектричного шару. Таким чином були знайдені характеристики розсіювання структури, яка розглядається. Наприклад, поля, розсіяні МПС у випадку падіння H-поляризованої хвилі мають вигляд:

$$H_y^i = \frac{r}{4} \sum_n \frac{e^{ix_n} e^{iz_n} e^{-ih_p z_n}}{\chi_n} \times \sum_n a_n^p e^{ik_r z} (\chi_n^p + i\chi_n) [\chi_n W_3^p - \psi_n W_2^p + k W_6^p], \quad (7)$$

$$H_y^r = \frac{r}{4} \sum_n \frac{e^{ix_n} e^{iz_n} e^{-ih_0 z_n}}{\chi_n} \times \sum_n b_n^0 e^{ik_0 z} (\chi_n^0 + i\chi_n) [\chi_n W_3^0 - \psi_n W_2^0 + k W_6^0], \quad (8)$$

де  $W_2^0, W_3^0, W_6^0, W_2^p, W_3^p, W_6^p$  - приведені власні вектори відповідно першого й останнього шарів.

З метою перевірки ефективності отриманого розв'язання за даним алгоритмом була побудована комп'ютерна програма, яка дозволяє розраховувати характеристики розсіювання вибраного типу МПС.

Розрахунки конкретизовані для круглих діелектричних, коаксіальних магнітодіелектричних брусів і трубок; магнітодіелектричних круглих брусів і ешелету, які наближуються за своїми властивостями до металевих, а також двошарових магнітодіелектричних ґраток, що наближуються за своїми властивостями до двох'ярусних металевих стрічкових ґраток.

Проведено ілюстрований графіками аналіз модулів коефіцієнтів відбиття і проходження структур в залежності від частотного параметра. Отримані такі результати:

1. При дослідженні розсіювання на діелектричних круглих брусах Е-поляризованої хвилі було проведено порівняльний аналіз експериментальних даних, які були опубліковані в літературі, і кривих коефіцієнта проходження по нульовій гармоніці, отриманих за алгоритмом, наведеним у поданій роботі. Відзначається задовільний збіг з експериментальними даними, наведеними для діелектричних круглих брусків з коефіцієнтом заповнення 0.25 і повний графічний збіг з теоретичним розрахунком, який виконано для цих же брусків. Відзначається практично повний збіг експериментальних даних, виконаних для діелектричних круглих брусків з коефіцієнтом заповнення 0.5.

2. При дослідженні розсіювання на діелектричних круглих брусах Н-поляризованої хвилі відзначається повний графічний збіг кривих, отриманих викладеним методом з кривими залежностей коефіцієнта відбиття по нульовій гармоніці від частотного параметру при різних кутах падіння хвилі, отриманих методом проекційного зшивання при подібних параметрах розсіюючої структури.

3. При дослідженні розсіювання Н-поляризованої хвилі на магнітодіелектричних структурах, а саме: ешелетах, круглих брусах, двошарових стрічкових ґратках, що наближаються за своїми властивостями до структур з ідеального металу, отримано повний графічний збіг з кривими залежностей модуля коефіцієнта проходження від частотного параметра, отриманих методом часткового обернення при подібних параметрах розсіюючих структур.

4. При дослідженні розсіювання Е-поляризованої хвилі на магнітодіелектричному ешелеті і круглих брусах, що наближуються за своїми властивостями до структур з ідеального металу, отримано повний графічний збіг з кривими залежностей коефіцієнта проходження від частотного параметра, отриманих методом часткового обернення при подібних геометричних параметрах розсіюючих структур для ешелету і деяке розходження в області інтерференційних резонансів, зумовлених неідеальністю металу для круглих брусків.

5. Наведено ілюстративні графіки (див. рис.4, рис.5) коефіцієнта проходження по нульовій гармоніці при розсіюванні відповідно Е(Н)-поляризованої хвилі на періодичних магнітодіелектричних коаксіальних круглих брусах в залежності від частотного параметра. На графіках видно велику залежність коефіцієнта проходження не

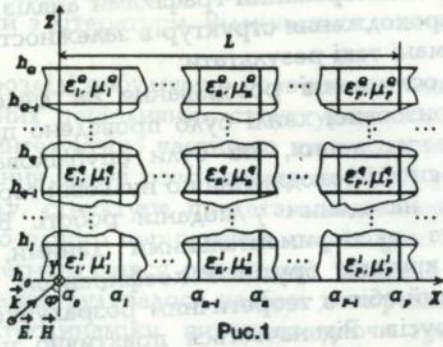


Рис.1

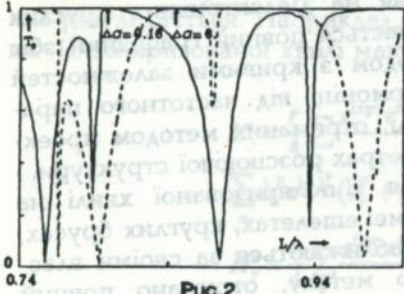


Рис.2

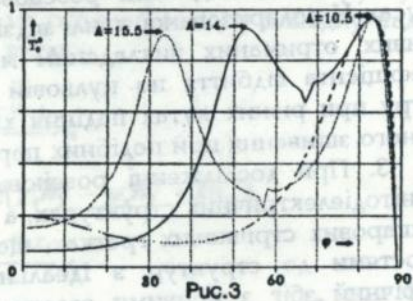


Рис.3

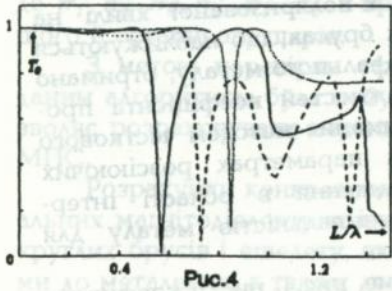


Рис.4

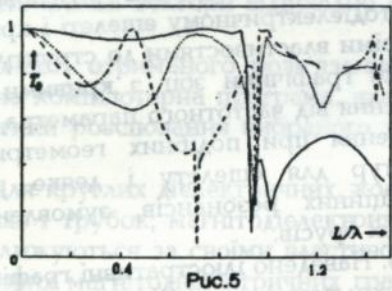


Рис.5

тільки від геометрії розсіюючої структури, але й від величини магнітної та діелектричної проникності брусків.

6. При дослідженні характеристик розсіювання  $H(E)$ -поляризованої хвилі на системі магнітодіелектричних періодичних шарів при  $L/\lambda \ll 1$  отримана рекурентна формула, яка зв'язує коефіцієнт відбиття (проходження) системи  $P-1$  шарів з коефіцієнтом відбиття (проходження) системи  $P$  шарів через фізичні параметри  $P$ -го шару. Можна зробити висновок, що за допомогою цієї формули стає можливим успішне дослідження розсіювання від частоперіодичних структур з будь-якими скалярними функціями  $\varepsilon(x, z), \mu(x, z)$  матеріальних параметрів заповнення періоду. Розсіювання хвиль на частих магнітодіелектричних структурах, розташованих на ідеально-провідній підложці можна вивчати, якщо в останньому шарі структури здійснити граничний перехід до ідеального металу. Таким чином можна отримати еквівалентні граничні умови.

У висновках сформульовані основні наукові результати дисертаційної роботи, подано напрямки передбачуваного розвитку тематики дисертації.

1. Наведено математично коректний метод дослідження розсіювання електромагнітних хвиль на двовірних МПС.

2. Подано методику переходу МПС - ідеальнопровідна періодична структура у резонансному діапазоні довжин хвиль.

3. Виявлено ефекти: Малюжинця у випадку частоперіодичного магнітодіелектричного шару для  $E$ -поляризованих хвиль;

ефект зміщення максимуму коефіцієнта проходження по частотній шкалі при зміні розташування ґраток відносно одне одного при дослідженні характеристик розсіювання  $E$ -поляризованої хвилі на вкладених діелектричних ґратках;

ефект руху максимуму коефіцієнта проходження по кутовій шкалі при зміні глибини модуляції шару при теоретичному дослідженні характеристик розсіювання  $E$ -поляризованої хвилі на періодично модульованому діелектричному градієнтному шарі.

4. Наведено аналітичні формули для знаходження коефіцієнтів проходження і відбиття при розсіюванні електромагнітних хвиль у довгохвильовому діапазоні.

5. Наведено алгоритми розрахунку коефіцієнтів проходження, відбиття МПС з довільною конфігурацією періоду при розсіюванні на них електромагнітних хвиль у резонансному діапазоні.

По матеріалам дисертації опубліковані наступні праці:

1. Borovskiy I.V., Gamulia O.G., Khizhnyak N.A., Yachin V.V. The scattering of electromagnetic waves by two-dimensional gratings with magnetodielectric rods // Journal of electromagnetic waves and applications. - 1995. - V. 9. - No 4. - P. 555-568.

2. Khizhnyak N.A., Ryazantseva N.V., Yachin V.V. The scattering of electromagnetic waves by a periodic magnetodielectric layer // Journal of electromagnetic waves and applications. - 1996. - V. 10. - No 5. - P. 731-739.

3. Хижняк Н.А., Ячин В.В. Рассеяние электромагнитных волн на системе частопериодических слоев из различных материалов // Электромагнитные волны и системы. - 1997. - Т.2. - №1. - С. 18-23.

4. Borovskiy I.V., Gamulia O.G., Khizhnyak A.N., Yachin V.V. The scattering of electromagnetic waves from two-dimensional grating with magnetodielectric rods in the resonance region // Progress in Electromagnetic Research Symp. July 1-9 1991. - Cambridge, Massachusetts, USA, 1991. P. 131.

5. Borovskiy I.V., Gamulia O.G., Yachin V.V. The scattering by electromagnetic waves from two-dimensional grating with magnetodielectric rods // Math. Meth. in Electromag. Theory Conf., September 19-24. - Alushta, 1991. P. 292-293.

6. Хижняк Н.А., Ячин В.В. Рассеяние плоских электромагнитных волн на мультисегментном магнитоэлектрическом слое // Межд. харьк. симп. "Физика и техника мм и субмм волн": Тез. докл., Т.1. - Харьков, 1994. - С.37-38.

7. Khizhnyak N.A., Yachin V.V. The scattering of electromagnetic waves by a periodic magnetodielectric layer // Math. Meth. in Electromag. Theory Conf.: Trans. - Kharkov, 1994. P. 476-478.

В.В.Ячин. "Исследование рассеяния электромагнитных волн на двумерных магнитоэлектрических периодических структурах." Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.03.04 - радиопизика.

**Аннотация.** Предложен строгий численно-аналитический метод исследования характеристик рассеяния плоских электромагнитных волн на двумерных периодических магнитоэлектрических структурах с различной конфигурацией периода.

V.V.Yachin. "The investigation of electromagnetic waves scattering by two-dimensional magnetodielectric periodic structures. Dissertation for a Candidate of Science (Physics and Mathematics) degree in speciality 01.03.04 - radiophysics.

**Abstract.** The rigorous numerical-analytical method for investigation of scattering characteristics of plane electromagnetic waves scattered by two-dimensional periodic structures with an arbitrary configuration of a period has been suggested.

**Ключові слова:** магнітодіелектрична періодична структура, інтегральні рівняння макроскопічної електродинаміки, функція Гріна, функціонал, коефіцієнт проходження (відбиття), розсіяне поле.

---

Подписано в печать 25.02.97 г.

Объем 2 печ. л.

Уч.-изд. л. - 1,75

Формат бумаги 60x84 1/16

Тираж 100 экз.

Лак. 22/45

---

Типография ИВ, пл. Свободы, 6

432465



---

	Подписано к печати 25.02.97 г.
Объем 2 печ. л.	Уч.-изд. л. - 1,75
	Формат бумаги 60x84 1/16
Тираж 100 экз.	Зак. 22/45

---

Типография ХВУ, пл. Свободы, 6

432469

AB 38.119