

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

*На правах рукопису*

**УДК 537.874.6**

**Карвицький Геннадій Єммануїлович**



**ДИФРАКЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА МЕТАЛЕВИХ  
ЕКРАНАХ, ЩО РОЗТАШОВАНІ НА ШАРІ ДІЕЛЕКТРИКУ**

**01.04.03 — радіофізика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня**

**кандидата фізико-математичних наук**

**Харків — 1997**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті НАН України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
Просвірнін Сергій Леонідович,  
Радіоастрономічний інститут НАН України, за  
відділом

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
Хижняк Микола Антонович, Інститут плазмової  
електроніки та нових методів прискорення НН  
ХФТІ, заст. директора;

доктор фізико-математичних наук, старший нау-  
ковий співробітник Сиренко Юрій  
Константинович, ІРЕ НАН України, зав.  
відділом.

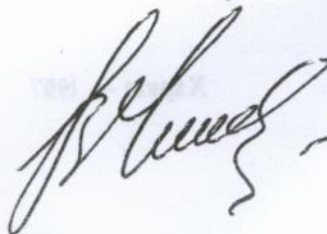
Провідна установа: Харківський технічний університет радіо-  
електроніки, Мін. освіти України, м. Харків

Захист відбудеться "26" грудня, 1997 р. о 14.00 годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського  
державного університету (310077, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. 3.9.)

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці  
ХДУ.

Автореферат розісланий "25" листопада 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

 Чеботарьов В.І.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00737618 (W)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Тривалий час дослідження в теорії дифракції електромагнітних хвиль обмежувались двомірними моделями реальних електродинамічних структур. Такі моделі, що були, як правило, наближеними, хоча і не дозволяли отримувати точні значення дифракційних характеристик, однак в багатьох випадках приводили до досить вірного якісного розуміння експериментальних даних. В межах двомірної теорії було детально досліджено дифракцію електромагнітних хвиль на таких електромагнітних структурах, як металеві циліндри і стрічки, скінчені ґратки і т. ін. На цей час більшість класів двомірних задач вивчені досить повно.

Сучасний етап розвитку теорії дифракції характеризується переходом до дослідження тримірних моделей, які враховують скінченість розмірів реальних електродинамічних структур. На відміну від двомірних, вирішення тримірних задач пов'язано з більшими теоретичними і обчислювальними труднощами. Це пояснюється не лише збільшенням вимірностей задачі, але і відсутністю досить повної математичної теорії. Застосування загальних прямих методів до вирішення тримірних задач (див. Колтон Д., Кресс Р., Нікольський В.В., Самарський О.А., Хижняк М.А.), без сумніву, складає теоретичний інтерес і дає можливість побудувати універсальні чисельні алгоритми для вирішення широкого кола задач. Однак, для багатьох конкретних практичних задач такі універсальні алгоритми виявляються мало ефективними і не дають достатньої точності. З цієї причини здається доцільним розробка менш загальних, спеціалізованих методів і алгоритмів, які б більш точно враховували специфіку деякого певного класу задач. Втрачаючи в загальному, ці методи здатні забезпечувати вищу ефективність вирішення задачі.

Одним з таких класів тримірних задач дифракції, що складають значний практичний інтерес, є клас задач, пов'язаний з дифракцією хвиль на плоских екранах скінчених розмірів, розміщених на планарних структурах різного типу, таких як шар діелектрику, екранований

шар діелектрику, багат шаровий діелектрик та ін. Дослідження даного класу почалося досить давно із-за необхідності вирішення конкретних інженерних задач. Так в роботах Джіан-Мін Джина (Jian-Ming Jin), Волакиса Дж.Л. (Volakis J.L.), Чена Ч.Ч. (Chen C.C.), Монтгомері Дж.П. (Montgomery J.P.) и Лі С.В. (Lee S.W.) була досліджена дифракція на напівпрозорих екранах з металевих пластин на шарі діелектрику, в роботі Комінамі (Komunami) і Масанобу (Masanobu) було розглянуто поведінку диполей на шарі напівнескінченного діелектрика. Однак ці дослідження проводились загалом евристичними методами, які базувались на деяких додаткових припущеннях.

Бурхливий розвиток мікрополоскової техніки привертав особливу увагу до задач дифракції на металевих екранах, розміщених на шарі тонкого екранованого діелектрику. Для розрахунку мікрополоскових пристроїв було розроблено велику кількість евристичних методів, які враховують їх специфічні резонансні властивості, такі як метод лінії передач (transmission line method), резонаторний метод (cavity method). Ці заздалегідь наближені методи не задовольняють зростаючі вимоги до точності, яку вимагає практика, отже особливо увагу дослідників в останній час привертають так звані строгі методи, які дозволяють отримати рішення з будь-якою наперед заданою точністю.

Безпосереднє застосування проєкційного методу до цього класу задач виявилось недостатньо ефективним, оскільки воно погано враховувало наявність хвилеведучої властивості планарних структур. Алексополос Н.Г. (Alexopoulos N.G.), Позар Д.М. (Pozar D.M.), Узуноглу Н.К. (Uzunoglu N.K.) і Фікіоріс Дж.Г. (Fikioris J.G.) запропонували удосконалення цього методу, яке усувало названий недолік. Воно базувалося на використанні точного виразу для функції Гріна екранованого діелектрику в спектральній області. Подальші дослідження в роботах Вена Ч.Ч. (Weng C.C.) і Позара Д.М. показали високу ефективність цього методу, що сприяло широкому застосуванню для вирішення різноманітних задач мікрополоскової техніки.

Металеві екрани, розташовані на шарі як екранованого, так і неекранованого діелектрику, загалом кажучи, відносяться до відкритих

електродинамічних структур. Особливість же мікрополоскових структур полягає в тому, що по своїй конструкції вони наближаються до закритих електродинамічних структур, а це пов'язано з високою добротністю порожнини, утвореної полоском з металевою основою діелектрику. Використання власних мод цього резонатору як базисних функцій у методі моментів веде до істотного спрощення чисельного аналізу дифракційних властивостей мікрополоскових структур, однак металеві пластини на шарі діелектрику без екрану, як і більшість інших планарних структур, такими властивостями не володіють і, як наслідок, є широкополосними, багатомодовими структурами. Тому для них застосування проєкційних методів пов'язано з низкою нових труднощів. З цієї причини одним із завдань, які ставились в дисертації, було розробити метод вирішення класу задач електромагнітної дифракції на металевих екранах, розміщених на шарі діелектрику. При цьому нами використовувався великий досвід досліджень у двомірній теорії дифракції на відкритих структурах.

Зараз існує ряд методів вирішення двомірних задач дифракції електромагнітних хвиль на металевих екранах. Широке розповсюдження отримали метод сингулярних інтегральних рівнянь, що розглядався в роботах Велієва Е.І., Ганделя Ю.В., Назарчука З.Т., Тучкіна Ю.А., і методи, засновані на ідеї напівобернення оператора (см. Канторович Л.В., Акілов Г.П.). Різними реалізаціями методу напівзвернення оператору було досліджено велику кількість задач, у тому числі і задачі дифракції на двомірних планарних структурах. Так, наприклад в роботах Аграновича З.С., Марченко В.О., Шестопалова В.П., Масалова С.О., Сологуба В.Г., Литвиненко Л.М., Просвірніна С.Л., Кириленко А.А., Сиренко Ю.К., Лерера А.М., Чумаченко В.П. були досліджені задачі дифракції на незамкнених екранах, періодичних ґратках і циліндричних структурах різного типу.

В роботі Литвиненко Л.М., Просвірніна С.Л. було розглянуто один із варіантів методу напівзвернення оператору, який, як було показано, є еквівалентним методу моментів зі спеціально вибраним базисом (так званий базис ортогональної підстановки). Такий вибір

базису не обмежується розмірністю задачі, і тому допускає узагальнення на тримірні задачі. Побудові узагальнення базису ортогональної підстановки для досліджуваного класу тримірних задач і дослідженню дифракції електромагнітних хвиль на базових тримірних планарних металодіелектричних структурах і присвячена ця робота.

Відповідно до поставленої мети в ході роботи ставилися наступні задачі:

- 1 Розробка методу вирішення задачі електромагнітних хвиль на плоских металевих прямокутних екранах, розташованих на шарі діелектрику.
- 2 Створення чисельного алгоритму і його практична реалізація у вигляді функціонально завершеної комп'ютерної програми.
- 3 Дослідження збіжності алгоритму на базі проведення чисельних експериментів, формулювання емпіричних правил вибору числа базисних функцій.
- 4 Оптимізація алгоритму з урахуванням отриманої інформації.
- 5 Дослідження дифракційних властивостей базових електродинамічних структур:

прямокутна пластина на шарі діелектрику;

гратки із прямокутних пластин на шарі діелектрику, розташованих періодично в одному напрямі.

Актуальність теми дослідження пов'язана з практичною потребою у строгих чисельних методах вирішення тримірних задач дифракції на плоских екранах, розташованих на планарних металодіелектричних структурах. Поставлені задачі є модельними для широкого класу задач синтезу різноманітних пристроїв НВЧ, тому розробка методів їх вирішення і дослідження дифракційних характеристик є актуальними проблемами сучасної теорії дифракції.

Дисертаційна робота є складовою частиною держбюджетної пошукової теми "Дослідження вібраторних смугових хвилеводних випромінювачів та антених ґраток" ("Фара", № 0 193 U 035237)

**Наукова новизна:** В роботі отримано наступні результати, які представляють наукову новизну:

- 1 Вперше розглянуто в строгій постановці задачу дифракції електромагнітних хвиль на електродинамічних структурах, складених з прямокутних металевих пластин на шарі діелектрику.
- 2 Запропоновано базисні функції, які дозволили створити на основі методу моментів ефективний алгоритм вирішення задач дифракції на електродинамічних структурах з прямокутних екранів для довгохвильового і резонансного діапазонів.
- 3 Запропоновано модифікацію чисельного алгоритму, що дозволяє істотно підвищити ефективність обчислення частотних залежностей дифракційних характеристик задачі.
- 4 Вперше досліджено дифракційні характеристики прямокутної пластини на діелектричному шарі і періодичної ґратки із цих пластин.
- 5 Виявлено ефект переважної ТЕ-поляризації поля, розсіяного металевим екраном в шар діелектрику.
- 6 Знайдено аналітичний характер поведінки поля, розсіяного періодичною ґраткою в околах точок ковзання, виявлено ефект щільного резонансу для періодичних ґраток з прямокутних пластин з вузькими щілинами.

**Практична цінність отриманих результатів** визначається наступним:

- 1 Розглянутий у роботі метод рішення задач дифракції хвиль на прямокутних екранах, розташованих на шарі діелектрику, дозволяє отримати з високою точністю різноманітні електродинамічні характеристики розсіяних полів.
- 2 Ефективність розроблених алгоритмів і програм забезпечує можливість їх застосування в системах машинного проектування НВЧ-приладів.

3 Фізичні особливості розсіювання хвиль на скінчених екранах і періодичних ґратках, розташованих на шарі діелектрика, становлять інтерес для застосувань.

4 Строге рішення задачі розсіювання електромагнітних хвиль на екранах скінчених розмірів може бути використане для оцінки можливості застосування більш простих двомірних моделей і точності наближених рішень.

Вірогідність отриманих в роботі результатів обумовлена строгою постановкою задачі, використанням адекватних математичних методів, контролем фізичної коректності результатів і порівнянням їх з результатами розрахунків наближеними методами, а також порівнянням з результатами використання двомірних моделей.

Дисертація складається із вступу, трьох глав, закінчення, списку літератури і одного додатку. Повний обсяг дисертації складає 114 сторінок (35 рисунків — 34 ст., 6 таблиць — 4 ст., додаток — 3 ст., список літератури — 5 ст., 52 найменувань). У вступі коротко викладено постановка задачі, стан області дослідження, мета роботи і основні результати.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

В першій главі вивчається постановка та методи рішення задач дифракції на планарних діелектричних структурах з екранами (див. рис. 1). Перший параграф цієї глави присвячено математичній постановці задачі дифракції електромагнітних хвиль на планарній структурі з металевим екраном довільної форми. Тут формулюється загальна схема знаходження рішення задачі в два етапи.

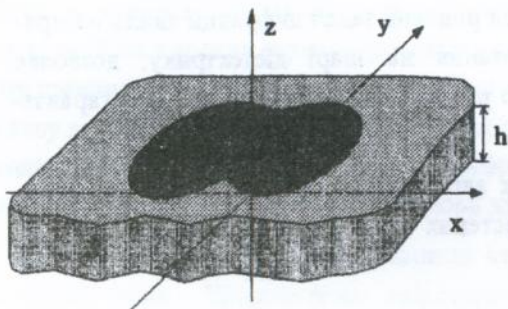


Рис. 1

На першому етапі, який докладно розглядається у другому параграфі, знаходиться залежність розсіяного поля від розподілу струму  $I$  на металевій пластині, яка розташована на шарі діелектрику. При цьому функція поверхневого розподілу струму є довільною і задовольняє тільки досить загальні математичні вимоги, а тому знайдена залежність фактично є оператором  $\{E(\mathbb{I}), H(\mathbb{I})\}$  від  $I$ .

На другому етапі, який розглядається у третьому параграфі, задача знаходження розсіяного поля зводиться до рішення інтегрального рівняння відносно густини поверхневого струму, який індукується зовнішнім полем на металевому екрані. За змістом це інтегральне рівняння являє собою умову рівності нулю на металі дотичної складової сумарного поля (поля у випадку відсутності екрану  $E_r^e$  і розсіяного поля  $E_r(\mathbb{I})$ ).

$$E_r(\mathbb{I}) + E_r^e = 0, \text{ на металі.}$$

Вплив планарної діелектричної структури в цьому рівнянні враховано аналітично видом спектральної залежності розсіяного поля від струму. Крім того, в третьому параграфі розглянуто формальну схему розв'язання інтегрального рівняння методом моментів, надано формули для обчислення коефіцієнтів матриці взаємного опору і вектору узагальнених напруг, які зручні для використання спектральної форми залежності розсіяного поля від розподілу струму.

У четвертому параграфі отримані вище результати узагальнюються на періодичні ґратки, які складаються з екранів скінченного розміру. Розв'язання задачі дифракції електромагнітних хвиль на періодичних ґратках зводиться до інтегрального рівняння відносно невідомого розподілу струму на одній з пластин ґраток, аналогічного знайденому раніше рівнянню для знаходження розподілу струму на окремому екрані. При цьому інтерференція полів, що розсіюються окремими екранами ґраток, аналітично враховується видом залежності розсіяного поля від розподілу струму. У п'ятому параграфі виводяться формули для безпосереднього знаходження розсіяного поля в дальній зоні для окремого екрану і періодичних ґраток.

В шостому параграфі обговорюються загальні труднощі отримання чисельного розв'язання на основі описаного алгоритму та засоби їх подолання. Зокрема, тут запропоновано метод, заснований на вилученні квазістатичної частини у виразі для коефіцієнтів матриці взаємних опорів, який дозволяє на порядок скоротити об'єм розрахунків при отриманні дифракційних характеристик для екранів однакової форми.

Друга глава дисертації присвячена детальному дослідженню конкретної задачі — задачі дифракції електромагнітних хвиль на прямокутній пластині, яка розташована на шарі діелектрику. Цій задачі приділена особлива увага, оскільки вона може розглядатися як еталонна для всього класу задач дифракції хвиль на екранах с планарними структурами малої добротності.

В першому параграфі вивчається питання збіжності наближених розв'язань з ростом числа базисних функцій. Досліджується вплив на збіжність таких параметрів задачі як діелектрична проникність і товщина шару, тип поля, що збуджує (нормально падаюча об'ємна хвиля, власні хвилі діелектричного шару), його частота, розміри пластини. Параграфи другий і третій присвячено детальному аналізу розсіювання пластинкою відповідно нормально падаючої плоскої хвилі і власних хвиль діелектричного шару. Надано чисельні результати. Діаграми напрямленості поля, що розсіяне у вільний простір і в шар діелектрику; частотні характеристики розсіяного поля. Надано аналіз взаємної трансформації особистих хвиль діелектричного шару при розсіянні на пластині та перетворення власних хвиль в поле в вільному просторі і навпаки. Розглянуто вплив на ці процеси величини діелектричної проникності і товщини шару. Досліджено область, в якій можливо застосування двовірної теорії дифракції для розрахунків реальних електродинамічних структур скінчених розмірів.

Третя глава присвячена дослідженню задач дифракції електромагнітних хвиль на ґратах із прямокутних металевих пластин на шарі діелектрику (див. рис. 2). В першому і другому параграфах розглянуто збудження ґраток відповідно нормально падаючою хвилею і власними

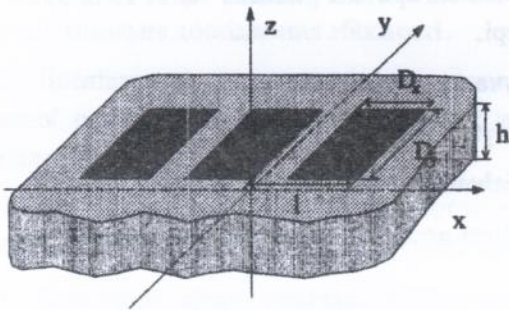


Рис. 2

хвилями діелектричного шару. Доведено, що поле, яке розсіяне нескінченими ґратками у вільний простір, складається із пучків хвиль, у яких стали розповсюдження нахилени до вісі періодичності ґратів  $Ox$  під дискретним набіром кутів  $\{\alpha_m\}_{m=-\infty}^{\infty}$ .

Скінчене число цих кутів є

дійсним, решта — уявні, відповідні хвилям, які розповсюджуються вздовж ґраток і експоненціально спадаються при віддаленні від неї. Крім того, ґрати розсіюють електромагнітні хвилі в шар діелектрику у вигляді скінченного числа гармонік власних хвиль шару.

Для тримірних ґраток досліджено поведінку розсіяного поля в околах точок ковзання. Встановлено частоти, при яких спостерігається аномальна поведінка дифракційних характеристик, надано аналіз сингулярностей. Наведено результати чисельних розрахунків: амплітуди дифракційних гармонік полів, які розсіяні у вільний простір і в шар діелектрику; частотні характеристики розсіяної потужності. Надається порівняння характеристик тримірних і двомірних ґраток.

Третій параграф присвячено дослідженню аналогії періодичних ґраток із прямокутних пластин на шарі діелектрику з періодичними ґратами з напівнескінчених брусків. Зокрема, знайдено ефект резонансної зміни коефіцієнту проходження власної хвилі ТЕ-типу скрізь періодичні ґрати, відомий у двомірній теорії дифракції як "щільний резонанс".

У висновках роботи сформульовані основні результати.

**Особистий внесок здобувача:**

- 1 Участь у математичній постановці задачі.

- 2 Розробка методу і чисельних алгоритмів рішення задач та їх практична реалізація на комп'ютері.
- 3 Здійснення розрахунків і участь у аналізі їх результатів.
- 4 Підготовка матеріалів до публікації.

#### **Апробація роботи та публікації:**

Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на таких конференціях та семінарах:

- Міжнародній конференції ММЕТ-96, 1996 р., м. Львів.
- Радіофізичному семінарі Радіоастрономічного інституту НАН України.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у наступних наукових працях:

1. Карвицкий Г.Э., Просвирнин С.Л. Рассеяние электромагнитных волн прямоугольной металлической пластиной на слое диэлектрика // Радиотехника и электроника. - 1996. - Т. 41, - № 10. - С. 1157 - 1161.
2. Карвицкий Г.Э., Просвирнин С.Л. Дифракция собственных волн диэлектрического слоя на прямоугольной металлической пластине // Доп. НАН Укр. - 1997. - №2. - С. 90 - 94.
3. Карвицкий Г.Э., Просвирнин С.Л. Дифракция собственных волн диэлектрического слоя на периодической решетке из прямоугольных пластин // Радиофизика и радиоастрономия. - 1996. - Т. 1, - № 2. - С. 237 - 242.
4. Karvitsky G.E., Prosvirnin S.L. Electromagnetic diffraction by a periodic grating of rectangular patches placed on dielectric slab // Proc. of VI-th International Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ-96). - Lviv. - 1996. - P. 487-489.

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

- 1 Розробка строгого чисельного метода розв'язання задач дифракції електромагнітних хвиль на металевих екранах, розташованих на шарі

діелектрику, який засновано на методі моментів зі спеціальним базисом. Чисельне дослідження збіжності.

2 Дослідження електродинамічних властивостей прямокутної металеві пластини на шарі діелектрику і періодичних ґраток з таких пластин.

3 Дослідження межі можливості застосування двомірних моделей для вивчення дифракції хвиль на скінчених металевих стрічках.

4 Виявлення ефекту переважної ТЕ-поляризації поля, що розсіюється металевим екраном в шар діелектрика.

5 Виявлення характеру поведінки поля, що розсіяне періодичними ґратками з екранів скінченого розміру в околах точок ковзання.

6 Виявлення ефекту щільового резонансу в тримірній задачі дифракції на періодичних ґратках з прямокутних пластин з вузькими щілинами.

## АНОТАЦІЇ

Карвицький Г.Є. Дифракція електромагнітних хвиль на металевих екранах, що розташовані на шарі діелектрику. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 — радіофізика. — Харківський державний університет, Харків, 1997.

В дисертації розглянуто клас тримірних задач дифракції електромагнітних хвиль на тонких металевих екранах прямокутної форми, що розташовані на межі планарних діелектричних структур. Як метод вирішення був використаний один із варіантів методу моментів, який аналітично враховує вплив на розсіяне поле діелектричної структури. Запропоновано спеціальний базис, який ефективний для систем з низькою добротністю. Досліджено характеристики розсіювання просторових плоских хвиль і власних хвиль діелектричного шару ТМ-типів на одній прямокутній пластині і на ґратах із таких пластин, що розташовані на шарі діелектрику періодично в одному з напрямків.

Проведено порівняння розглянутих тримірних задач з двомірними моделями.

**Ключові слова:** дифракція електромагнітних хвиль, тримірні задачі, планарні структури, метод моментів, прямокутна пластина, періодичні ґрати.

Карвицкий Г.Э. Дифракция электромагнитных волн на металлических экранах, расположенных на слое диэлектрика. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 — радиофизика. — Харьковский государственный университет, Харьков, 1997.

В диссертации рассмотрен класс трехмерных задач дифракции электромагнитных волн на тонких металлических экранах прямоугольной формы, расположенных на границе планарных диэлектрических структур. В качестве метода решения использован один из вариантов метода моментов, аналитически учитывающий влияние на рассеянное поле диэлектрической структуры. Предложен специальный базис, эффективный для систем с низкой добротностью. Исследованы характеристики рассеяния пространственных плоских волн и собственных волн диэлектрического слоя ТМ- и ТЕ-типов на одной прямоугольной пластине и на решетке из таких пластин, расположенных на слое диэлектрика периодически в одном из направлений. Проведено сопоставление рассматриваемых трехмерных задач с двумерными моделями.

**Ключевые слова:** дифракция электромагнитных волн, трехмерные задачи, планарные структуры, метод моментов, прямоугольная пластина, периодические решетки.

Karvitsky G.E. Electromagnetic wave diffraction by metal screens on the dielectric slab. — Manuscript.

The thesis advanced to a scientific degree of candidate of physics and mathematics in the speciality 01.04.03 — radiophysics. — Kharkiv State University, Kharkiv, 1997.

In the thesis the 3-dimensional problem of electromagnetic waves diffraction by thin metal rectangular screens, placed on the dielectric low-gained structure is considered. The solution has been found using the moment method modification which takes account of the influence of dielectric structure on the scattered field. The special basis was proposed for the low-gained systems. The diffractive characteristics of the rectangular patch and periodic grating of such patches for different types of excitation (by spatial plane waves and by dielectric slab eigenwaves of TE- and TM-types) have been investigated. The considered problems were compared to the similar 2-dimensional problems.

Key words: electromagnetic wave diffraction, 3-dimensional problems, planar structures, moment method, rectangular patch, periodic grating.

