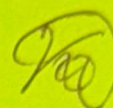


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

КАЛІБЕРДА МСТИСЛАВ ЄВГЕНОВИЧ



УДК 537.87

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ В ТЕОРІЇ ДИФРАКЦІЇ ХВИЛЬ НА
ПЛОСКИХ ЕКРАНАХ

01.04.03 – радіофізика

Реферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2024

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, академік, старший науковий співробітник
Мележик Петро Миколайович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України (м. Харків), радник при дирекції

доктор фізико-математичних наук, професор
Куриляк Дозислав Богданович,
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України (м. Львів), провідний науковий співробітник відділу теорії хвильових процесів та оптичних систем діагностики

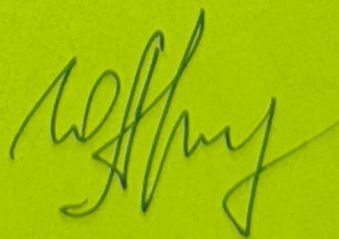
доктор фізико-математичних наук, старший дослідник
Ячин Володимир Васильович,
Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України (м. Харків), завідувач науково-дослідного відділу теоретичної радіофізики

Захист відбудеться *20 лютого 2025 р. о 14:00* годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, приміщення «Цифровий освітній простір» (0 поверх).

З дисертацією можна ознайомитись в Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Реферат розісланий *17 січня 2025 р.*

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Математичне моделювання та теоретичне дослідження явища дифракції електромагнітних хвиль на плоских ідеально провідних або матеріальних перешкодах є невід'ємною частиною радіофізичної науки. Поодинокі стрічки, системи стрічок, дисків, отворів і їхні об'єднання у багатошарові структури стали природними компонентами частотно-селективних поверхонь, антенних систем, сенсорів, поглиначів, збуджувачів та інше. Створення нових елементів і пристроїв НВЧ та ТГц діапазону потребує подальшого розвитку та вдосконалення існуючого математичного апарату. Побудова узагальнюючих моделей, максимально наближених до реальних фізичних об'єктів, на основі строгих математично обґрунтованих методів і стійких схем, дає можливість всебічного дослідження характеристик систем, передбачення можливих нових фізичних ефектів та властивостей. Такі моделі дозволяють створювати алгоритми розрахунків, які практично не мають обмежень, на відміну від чисто числових методів, покладених в основу, в тому числі, комерційних пакетів.

Чисто числові методи використовують, наприклад, наближені умови випромінювання, не враховують умову на ребрі, яка з математичної точки зору необхідна для єдиності розв'язку. Тим самим точність обмежується декількома знаками, а також є імовірність того, що буде отримано невірний розв'язок взагалі. Деякі схеми навіть є нестійкими. Наближені асимптотичні методи також дозволяють отримувати результати з обмеженою точністю, описати лише основні фізичні ефекти, проте за набагато менший комп'ютерний час.

Науковій тематиці, пов'язаній з дифракцією хвиль на плоских екранах, присвячена велика кількість робіт вчених (в тому числі й авторів Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна). Вдосконалення математичного апарату є невід'ємною частиною та передумовою аналізу фізичних явищ і ефектів. Дослідження цілого класу важливих об'єктів, таких як періодичні системи зі збоєм періодичності, системи, які комбінують розсіювачі різних типів, проводилося з суттєвими обмеженнями, наприклад, при певному співвідношенні розмірів елементів і довжини хвилі, відстані між ними. Сучасна електродинаміка, яка орієнтована на складнокомпозиційні багатошарові структури з елементами різного формоутворення, розвиток якої, в тому числі, пов'язано і з появою нових матеріалів, потребує подальшого вдосконалення математичного апарату.

Таким чином, розвинення чисельно-аналітичних методів, які аналітично враховують умови випромінювання та на ребрі, дозволяють отримати результати з будь-яким наперед заданим ступенем точності (який обмежується лише машинною точністю), з довільним співвідношенням параметрів і за прийнятний комп'ютерний час є **актуальною задачею**.

Однією з важливих задач теоретичного моделювання є скорочення витрат, пов'язаних з ресурсномісткими експериментальними дослідженнями, прогнозування властивостей перспективних матеріалів або прогнозування властивостей у недосяжних на цей час діапазонах частот, особливо у ближньому ТГц діапазоні.

Важливим є розробка методів, які дозволяють суттєво зменшити час обчислень. У роботі пропонується підхід, при використанні якого складна багатоелементна перешкода подається у вигляді об'єднання більш простих, якими

можуть виступати поодиноким стрічка, диск, отвір у площині та інше. Розв'язок так званої ключової задачі, задачі про дифракцію на поодинокій перешкоді є відомим або його отримано методами, які розвиваються у роботі. Властивості всієї структури визначаються з операторних рівнянь, за допомогою операторного методу. Ці рівняння, у підсумку, зводяться до матричних або інтегральних з подальшою дискретизацією на базі схеми, яка використовує квадратурні формули. Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час обчислень. Час обчислень зростає пропорційно до кількості шарів, а не кубічно.

Задачі про дифракцію на поодиноким неоднорідностях, які є складовими складної багатоелементної перешкоди, представляють і самостійний інтерес. Важливо розробити методологію, яка дозволяє однаково ефективно досліджувати як ідеально повідні структури, які є у певному сенсі спрощенням, так і матеріальні. У якості приклада імпедансної стрічки у роботі розглянуто стрічку з реально існуючого матеріалу, яким є графен. Графен – це відносно новий матеріал, який має низку корисних властивостей. Він є доволі міцним, у 100 разів міцніше за сталь, здатен підтримувати поверхневі плазмон-поляритонні хвилі та відповідні плазмонні резонанси вже у ближньому ТГц діапазоні, його властивостями можна керувати динамічно за рахунок прикладання електростатичного або магнітостатичного поля, тим самим змінюючи хімічний потенціал графену та, як наслідок, його провідність. Всі ці властивості обумовлюють перспективність використання графену у перестроюваних пристроях.

Електромагнітні властивості нових матеріалів, таких як, наприклад, графен, доволі точно описуються за допомогою використання імпедансних граничних умов у припущенні, що провідність є комплексно значною скалярною функцією. Тому розширення методів аналізу ідеально провідних стрічок на імпедансні стрічки є актуальною задачею.

Дослідження впливу краю на характеристики розсіяних полів потребує розвинення методів аналізу напівнескінчених структур. На відміну від класичної нескінченної ідеально періодичної структури, напівнескінченна система у розсіяному полі має хвилі з неперервним і дискретним спектром. Подальшим розвиненням моделі напівнескінченної структури є модель нескінченної періодичної, але зі збоєм у періодичності розташування елементів.

Потребує розв'язання актуальна задача дистанційного виявлення дефектів у багат шарових багатоелементних періодичних структурах шляхом аналізу розсіяного електромагнітного поля. Потребують вивчення системи при різних розмірах поодинокого розсіювача, відстані між ними, відстані між шарами. Розвинена теорія також може бути застосована і при аналізі антен з можливістю керування діаграмою спрямованості за рахунок виключення елементів з періодичного масиву.

Для ефективного керування характеристиками розсіяних полів необхідно розв'язання задачі оптимізації. Детерміністичні алгоритми мають суттєвий недолік, проблему збіжності до локального, а не глобального максимуму. До того ж в плані розвитку комп'ютерних технологій чітко просліджується тенденція до багатоядерності, багатопотоковості. Тому актуальним є розвиток паралельних

недетермінованих стохастичних алгоритмів, одним з яких є паралельний генетичний алгоритм.

Фундаментальною науковою проблемою, на вирішення якої спрямовано дослідження, є розвиток чисельно-аналітичних методів в теорії дифракції хвиль на багатоелементних структурах, побудова фізично коректних моделей для всебічного дослідження електродинамічних характеристик таких систем, включаючи системи, які базуються на використанні як ідеально провідних, так і імпедансних плоских екранів. Такі моделі можуть стати основою ефективних процедур оптимізації параметрів періодичних, напівнескінченних періодичних, обмежених багатоелементних структур з метою ефективного керування характеристиками розсіяних полів на основі недетермінованих стохастичних алгоритмів, одним з яких є паралельний генетичний алгоритм. Вирішення зазначеної проблеми дозволяє вказати нові ефективні шляхи розв'язання цілого ряду прикладних задач, в тому числі задачі дистанційної дефектоскопії в багат шарових багатоелементних періодичних структурах шляхом аналізу розсіяних полів, задачі керування характеристиками діаграм спрямованості антен за рахунок виключення елементів з періодичного масиву, задачі створення та суттєвого покращення робочих характеристик відомих радіотехнічних і радіоелектронних систем. Зазначений комплекс питань обумовлює як власне актуальність теми дисертаційної роботи, так і вибір напрямку досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики надвисоких частот факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна і є узагальненням результатів досліджень автора в рамках наукового напрямку кафедри. Тематика дослідження пов'язана з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки, затвердженими Кабінетом Міністрів України «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави», а також з пріоритетними напрямками фундаментальних наукових досліджень, затвердженими Міністерством освіти і науки України. Матеріали дисертації є складовою частиною держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), номер державної реєстрації 0111U010367, 0112U000563, 0115U000465, 0116U000819, 0123U102871, 0116U000036, 0119U002540, 0118U002038, 0117U004964, 0119U002535, 0122U001486, 0122U001436, 0124U000670. Автор був керівником двох НДР і виконавцем 11 НДР.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи* є розвинення строгих чисельно-аналітичних методів і формулювання єдиних підходів до розв'язання задач про дифракцію хвиль різної фізичної природи (акустичних, електромагнітних) на структурах з періодичним розміщенням розсіювачів, в тому числі скінченноелементних періодичних, нескінченних періодичних, нескінченних зі збоєм періодичності, напівнескінченних періодичних і їх комбінаціях. В рамках таких підходів створюються фізично коректні моделі, які дозволяють проводити як

аналіз характеристик розсіяних полів, так і проводити оптимізацію параметрів по вибраних критеріях.

Реалізація мети досягається за рахунок розв'язання наступних задач:

Розв'язання задач про дифракцію електромагнітних хвиль на напівнескінченних періодичних структурах, кількісне визначення впливу краю на електродинамічні властивості періодичних стрічкових решіток з ідеально провідних та імпедансних (графенових) стрічок.

Побудова строгих математичних моделей нескінченних періодичних систем зі збоєм в періодичності розташування елементів, вивчення впливу цього збою на характеристики розсіяних полів.

Побудова фізично коректних моделей випромінюючих, поглинаючих систем, хвилеводних збуджувачів, які складаються з імпедансних розсіювачів, оптимізація їх параметрів.

Розвинення єдиної методології на задачі про дифракцію акустичних й електромагнітних хвиль на аксіально-симетричних структурах.

Розвинення строгих методів аналізу дифракції хвиль на структурах, які поєднують в собі нескінченні та скінченні розсіювачі, а розсіяні поля в яких подаються як суперпозиція полів плоских, циліндричних та сферичних хвиль.

Розв'язання граничних задач електродинаміки у строгій постановці для багатоелементних систем неоднорідностей, розташованих в хвилеводах з ідеально провідними металевими стінками, в діелектричних хвилеводах та у вільному просторі з використанням операторного методу, методу сингулярних інтегральних рівнянь, методу моментів та їх комбінацій.

Об'єкт та предмет дослідження.

Об'єктом дослідження є фізичні процеси взаємодії хвиль різної природи з плоскими екранами, розсіяні поля яких мають як дискретний, так і неперервний спектр.

Предметом дослідження є фізичні закономірності взаємодії хвиль з плоскими екранами з різною топологією та кількісним складом, керування характеристиками розсіяння та їх оптимізація за обраними критеріями.

Методи дослідження. В дисертації для розв'язання поставлених задач застосовуються наступні чисельно-аналітичні методи: операторний метод, який використовує оператори проходження та відбиття поодинокого елемента багатоелементної електродинамічної структури; метод сингулярних інтегральних рівнянь; метод моментів. Для дискретизації отриманих інтегральних рівнянь пропонуються алгоритми типу Найстрема (метод дискретних особливостей, інтерполяційний метод). З використанням комбінації вказаних методів сформульовано єдиний підхід до дослідження електродинамічних об'єктів з різною внутрішньою топологією: скінченноелементних періодичних, нескінченних періодичних, нескінченних зі збоєм періодичності, напівнескінченних періодичних та їх об'єднань, електродинамічних об'єктів, розсіяні поля в яких складаються з плоских, циліндричних, сферичних хвиль та їх суперпозицій.

Наукова новизна отриманих результатів. Результати, які було отримано під час виконання дисертаційної роботи дозволили виявити та пояснити природу цілої низки фізичних ефектів і закономірностей взаємодії хвиль різної фізичної природи з

багатоелементними періодичними електродинамічними структурами, які характеризуються не лише різною внутрішньою топологією, але і різними матеріальними параметрами розсіювачів і середовища (ідеально провідні, графенові розсіювачі, діелектрик з втратами та інше). На базі розвинених методів отримано результати стосовно ефективного керування характеристиками розсіяних полів за рахунок вибору геометричних параметрів структури, матеріальних параметрів середовища, а також динамічно з використанням, наприклад, електростатичного поля для керування хімічним потенціалом речовини.

В рамках сформульованого підходу з використанням класичних методів аналізу і підходів сучасної радіофізики і математичної фізики отримано наступні нові наукові результати

1. З використанням операторного методу у сукупності з методом сингулярних інтегральних рівнянь і методом моментів розроблено фізико-математичні моделі напівнескінчених систем неоднорідностей різних типів. На основі цих моделей створено високоефективні обчислювальні алгоритми для розрахунку розсіяних полів та електродинамічних параметрів неоднорідностей.

1.1. *Вперше* отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на напівнескінченній решітці типу жалюзі як з ідеально-провідних, так і з імпедансних нескінченно тонких стрічок. Запропоновано розв'язок для напівнескінченної плоскої решітки.

1.2. На базі строгих методів кількісно визначено вплив краю стрічкових решіток на характеристики розсіяних полів, які мають як дискретний (плоскі хвилі), так і неперервний (циліндричні хвилі) спектри. Показано, що рівень відбиття від краю у бік опромінювача можна зменшити за рахунок розміщення додаткової скінченної решітки певної складної геометрії.

1.3. *Вперше* запропоновано процедуру регуляризації для виключення особливостей ядер операторних рівнянь для напівнескінчених структур, схему дискретизації на базі квадратурних формул, а також ітераційну процедуру з параметром релаксації для розв'язання нелінійного операторного рівняння.

1.4. Побудовано строгі розв'язки задач про дифракцію власних електромагнітних хвиль круглого хвилеводу на скінченній та напівнескінченній періодичній системах аксіально-симетричних неоднорідностей. Застосовано рекурентну процедуру до запису операторних рівнянь, що дозволило скоротити час обчислень. Проведено процедуру оптимізації параметрів на базі паралельного генетичного алгоритму.

2. Створено загальну теорію розсіяння електромагнітних хвиль на нескінченних періодичних решітках зі збоєм періодичності. Отримано строгі розв'язки задач про дифракцію та детально проаналізовано характеристики полів, які виникають за рахунок порушення періодичності.

2.1. *Вперше* з використанням розроблених строгих методів отримано результати про електродинамічні властивості хвилеводного каналу, сформованого на місці відсутніх стрічок двошарової нескінченної періодичної решітки.

2.2. Встановлено взаємний вплив ідеально провідних та графенових стрічок у періодичних решітках, направляючі властивості структур.

2.3. *Вперше* показано, що у випадку графенової нескінченної решітки, на відміну від решіток з ідеально провідних стрічок, у яких спостерігалася сильна взаємодія стрічок лише поблизу аномалій Релея-Вуда, взаємодія стрічок є помітно сильнішою як поблизу аномалії Релея-Вуда, так і поблизу плазмонних резонансів.

2.4. *Вперше* показано, що у випадку двошарової нескінченної графенової решітки без скінченної кількості стрічок шириною головного пелюстка діаграми спрямованості поля, яке пройшло, можна керувати, окрім зміни частоти або періоду, як у решітці з ідеально-провідних стрічок, ще й динамічно, за рахунок зміни хімічного потенціалу графену.

3. Розроблено узагальнюючу методологію для дослідження взаємодії імпедансних розсіювачів нульової товщини з плоскими електромагнітними хвилями.

3.1. *Вперше* отримано результати щодо електродинамічних характеристик графенових решіток, в тому числі напівнескінченної графенової стрічкової решітки у вакуумі та розміщеної в діелектричному хвилеводі, напівнескінченної системи шарів нескінченних графенових решіток у діелектричній плиті.

3.2. Виявлено та ретельно описано ефекти збудження цілої низки резонансів, які розглянуті структури здатні підтримувати, та їх вплив на характеристики полів: плазмонних резонансів, власних резонансів діелектричного шару, декількох типів резонансів, пов'язаних з періодичністю (резонанси поблизу аномалій Релея-Вуда, резонанси на решіткових модах, а також два типи резонансів, пов'язаних з періодичністю у розташуванні шарів). Проведено класифікацію резонансів.

3.3. Запропоновано способи керування характеристиками структур. Виявлено параметри, при яких спостерігається резонансне максимальне поглинання та розсіяння падаючої плоскої хвилі. Запропоновано способи розширення смуги поглинання за рахунок збудження вказаних резонансів.

3.4. *Вперше* показано, що одночасне збудження плазмонних резонансів та резонансів на решіткових модах забезпечує можливість суттєвого керування потужністю, яку переносять власні хвилі діелектричного хвилеводу.

3.5. Розроблено ефективний алгоритм оптимізації параметрів на базі паралельного генетичного алгоритму.

4. Операторний метод розвинено на структури, розсіяні поля в яких формуються циліндричними і сферичними хвилями, а також є суперпозицією хвиль трьох типів: плоскої, циліндричної і сферичної. Запропоновано уніфіковану процедуру запису рівнянь, застосування єдиних процедур регуляризації та дискретизації.

4.1. *Вперше* операторний метод застосовано для аналізу дифракції плоскої електромагнітної та акустичної хвилі на нескінченно тонкому кільці або кільцевій щілині у площині.

4.2. *Вперше* отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на ідеально провідній структурі, яка складається з напівплощини та системи дисків.

4.3. Запропоновано процедуру регуляризації для виключення особливостей ядер в інтегральних рівняннях. Розроблено схему дискретизації рівнянь.

4.4. Показано, що навіть у випадку, коли диск не освітлюється падаючою плоскою хвилею, а цілком знаходиться у області тіні, відбувається збудження циліндричних хвиль.

Практичне/теоретичне значення отриманих результатів. Сукупність отриманих результатів на базі розвинених строгих методів і узагальнення методології моделювання електродинамічних характеристик плоских екранів, в тому числі з імпедансними границями, зробили вагомий внесок в розвиток наукового напрямку – електродинаміку періодичних структур, розширили фундаментальні знання про фізичні процеси взаємодії полів різної природи зі складнокомпозиційними електродинамічними структурами.

Побудовані та реалізовані у вигляді алгоритмів багатокритеріального моделювання параметрів розглянутих структур математичні моделі дозволили реалізувати ще один етап в еволюції важливого напрямку прикладної електродинаміки, який пов'язано зі створенням систем автоматизованого проектування частотно-селективних поверхней, антенних систем, фільтрів, цілого класу керованих збуджувачів, поглиначів надвисокочастотного, субтерагерцевого та терагерцевого діапазонів частот. Привабливість запропонованих і реалізованих алгоритмів у порівнянні з різними комерційними пакетами полягає в тому, що ці алгоритми дозволяють здійснювати контроль точності розрахунків на всіх етапах моделювання та створювати систему взаємозв'язку між різними алгоритмами, що є істотним при проведенні процедури оптимізації параметрів.

На базі запропонованого підходу встановлено потенційні можливості електродинамічних структур, які моделюють реальні об'єкти, при наявності ряду факторів, впливаючих на процеси взаємодії електромагнітних хвиль у них. При розв'язанні задач дефектоскопії в реальних багатоелементних періодичних об'єктах наявність дефекту може бути встановлено по розсіяних полях на базі побудованих моделей систем зі збоєм періодичності, при створенні датчиків для контролю та вимірювання діелектричної та магнітної проникностей матеріалів і сумішей цінними є результати розрахунків електродинамічних характеристик хвилеводних систем з матеріальними включеннями, при створенні перестроюваних частотно-селективних поверхонь, поглиначів і антенних систем з контрольованою діаграмою спрямованості практично важливими і перспективними є багатошарові періодичні структури зі збоєм періодичності та графеновими включеннями.

Ще одним фактором, який визначає практичну цінність, – є фактор ресурсозбереження. Розвинені методи і побудовані моделі дозволяють передбачати характеристики тієї чи іншої структури і, при цьому, істотно скоротити матеріальні та часові затрати при створенні реальних функціональних пристроїв, що є дуже важливим при застосуванні дорогих матеріалів і елементів (наприклад, графена).

Побудовані алгоритми реалізовано у вигляді комп'ютерних програм, на які отримано авторські свідоцтва на право інтелектуальної власності.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 79 працях: 4 монографіях (1 з яких англomовна у видавництві Cambridge Scientific Publishers), 11 статтях у наукових фахових виданнях України, 29 статтях у фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 1 статті у фахових закордонних виданнях (які не входять до SCOPUS), 34 тезах доповідей на наукових

конференціях. Також наукові результати додатково відображено у 7 статтях, 2 тезах доповідей, 9 свідоцтвах про авторське право.

Особистий внесок здобувача. У роботах [1], [3] здобувач виконав постановку та розв'язання граничних задач, комп'ютерне моделювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів. У роботах [2], [4] здобувач виконав розв'язання задач дифракції на структурах, розсіяні поля в яких мають одночасно дискретний та неперервний спектр, розв'язання задач дифракції на системах перешкод у хвилеводах, оптимізація параметрів, аналіз та узагальнення отриманих результатів. У роботах [5], [6], [12], [15], [16], [18], [38], [40], [41], [42], [43], [44] здобувач виконав побудову математичної моделі, аналіз фізичних результатів. У роботах [8], [9], [17], [22] здобувач виконав постановку задачі, вибір методу розв'язання, побудову математичної моделі, аналіз фізичних результатів. У роботах [13], [14], [24], [25], [26], [28], [30], [31], [35], [36] здобувач виконав постановку задачі, вибір методу розв'язання, отримав сингулярне інтегральне рівняння, провів аналіз фізичних результатів. У роботах [10], [19], [21], [23], [27], [29], [33], [34], [45] здобувач виконав вибір методу розв'язання, отримав сингулярне інтегральне рівняння, провів аналіз фізичних результатів. У роботах [11], [37], [39] здобувач виконав постановку задачі, вибір методу розв'язання, отримав сингулярне інтегральне рівняння, провів оптимізацію параметрів, виконав аналіз фізичних результатів. У роботах [20], [32] здобувач вибрав метод розв'язання, побудував математичну модель, провів аналіз фізичних результатів. У роботі [7] здобувач виконав постановку задачі, провів оптимізацію параметрів, виконав аналіз фізичних результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації було представлено та обговорено на наступних міжнародних конференціях:

1. 2013 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, 23-28 June, 2013.
2. The Seventh International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Kharkiv, Ukraine, 15-19 September, 2014.
3. 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, Ukraine, 21-24 April, 2015.
4. VIII Международная научная конференция "Функциональная база нанoeлектроники". Одесса, Украина, 28 сентября, 2015.
5. 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016). Kharkiv, Ukraine, 20-24 June, 2016.
6. 2016 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Lviv, Ukraine, 05-07 July, 2016.
7. The 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Odessa, Ukraine, 05-11 September, 2016.
8. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June, 2017.
9. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017. Lviv, Ukraine, 17-20 October, 2017.

10. 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Kiev, Ukraine, 2018.
11. The 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), Odessa, Ukraine, 04-07 September, 2018.
12. IEEE 3th Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiKo'2018/UkrMiCo'2018). Odessa, Ukraine, 10-14 September, 2018.
13. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018). Kyoto, Japan, November 6-9, 2018.
14. 2nd URSI AT-RASC. Gran Canaria, 28 May – 1 June 2018.
15. European Microwave Conference in Central Europe, Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019.
16. 49th European Microwave Conference, Paris, France, 1–3 October, 2019.
17. IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 16-18 April, 2019.
18. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2019), Lviv, July 2-6, 2019.
19. 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, April 22-24, 2020.
20. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark, 15-20 March, 2020.
21. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, 21-25 September, 2020.
22. 50th European Microwave Conference. Utrecht, Netherlands, 12-14 January, 2021.
23. 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Düsseldorf, Germany, 22-26 March, 2021.
24. 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021). Lviv, Ukraine, 26-28 August, 2021.
25. 41th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, 10-14, October, 2022.
26. 2nd Ukrainian Microwave Week. Kharkiv, 14-18 November, 2022.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 539 сторінок, із них 414 сторінок основного тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями та 243 рисунками. Список використаних джерел містить 314 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ присвячено дослідженню дифракції плоскої електромагнітної хвилі на напівнескінченних періодичних, а також скінченноелементних та нескінченних періодичних стрічкових решітках. Геометрію напівнескінченних структур і напрямки поширення хвиль наведено на рис.1. З використанням операторного методу вперше отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію для напівнескінченної періодичної решітки типу жалюзі, яка, завдяки своїй геометрії, має властивості перенаправляти енергію падаючої хвилі в бік від опромінювача.

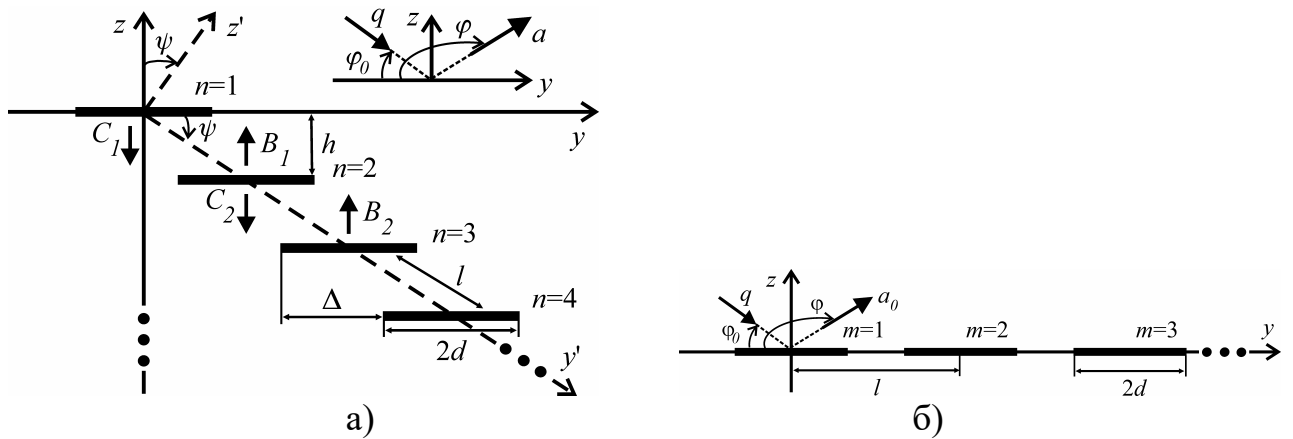


Рис.1 Геометрія напівнескінченних періодичних решіток. а) Решітка типу жалюзі, б) плоска решітка

Оператор відбиття R^1 знайдено з нелінійного операторного рівняння

$$R^1 q = r q + s^- e B_1 - r s^- e B_1, \quad B_1 = R^1 s^+ e q - R^1 s^+ e r q + R^1 s^+ e r s^- e B_1$$

де e , s^\pm – оператори, які визначають зміну амплітуди поля при зсуві системи координат вздовж осі Oz у напрямку поширення хвиль, а також у позитивному та негативному напрямку осі Oy , r – оператор відбиття поодинокі стрічки або, у загальному випадку, плоскої стрічкової решітки, q – амплітуда Фур'є падаючого поля. Поле, розсіяне напівнескінченною стрічковою решіткою, можна надати як суперпозицію полів, які мають дискретний (плоскі хвилі) та неперервний просторовий (циліндричні хвилі) спектр. Оператор відбиття R^1 має не інтегровані особливості у вигляді полюсів на дійсній осі у точках, які відповідають постійним поширення плоских хвиль. Для виключення особливостей запропонована процедура регуляризації. Після її проведення отримане нелінійне операторне рівняння

$$R = r + s^- e B - r s^- e B - r s^- e F_0 R s^+ e, \quad B = (I - R F s^+ e r s^- e)^{-1} (R F s^+ e r s^- e F_0 R s^+ e - R F s^+ e r),$$

де $R = R^1 - s^- e R^1 e s^+$, $B q = B_1 - R^1 s^+ e q$, F , F_0 – регуляризуючі оператори, яке підлягає чисельному розв'язанню. Воно подано у вигляді нелінійного сингулярного інтегрального рівняння, яке містить інтеграл у сенсі головного значення за Коші. Побудовано схему дискретизації на базі квадратурних формул для сингулярних інтегралів. Для розв'язання запропоновано ітераційну процедуру з параметром релаксації та метод Зейделя. Відповідний вибір значень параметру релаксації забезпечив збіжність процедури на противагу методу простої ітерації, при використанні якого процес розбігався, дозволив збільшити швидкість збіжності ітераційного процесу.

Досліджено поведінку полів у ближній та далекій зоні. На рис.2 наведено розподіл відбитого поля (дійсна частина H_y^{refl}) у ближній зоні в області над решіткою, $z > 0$. Чітко видно картину двох типів хвиль, які поширюються в бік від решітки: циліндричної, яка виникає в результаті розсіювання краєм напівнескінченної решітки, та плоскої, яка відповідає нескінченній частині решітки. Плоска хвиля існує лише в області $\varphi > w$, де φ – полярний кут, w – кут поширення відбитої плоскої хвилі, що також чітко видно на рис.2.

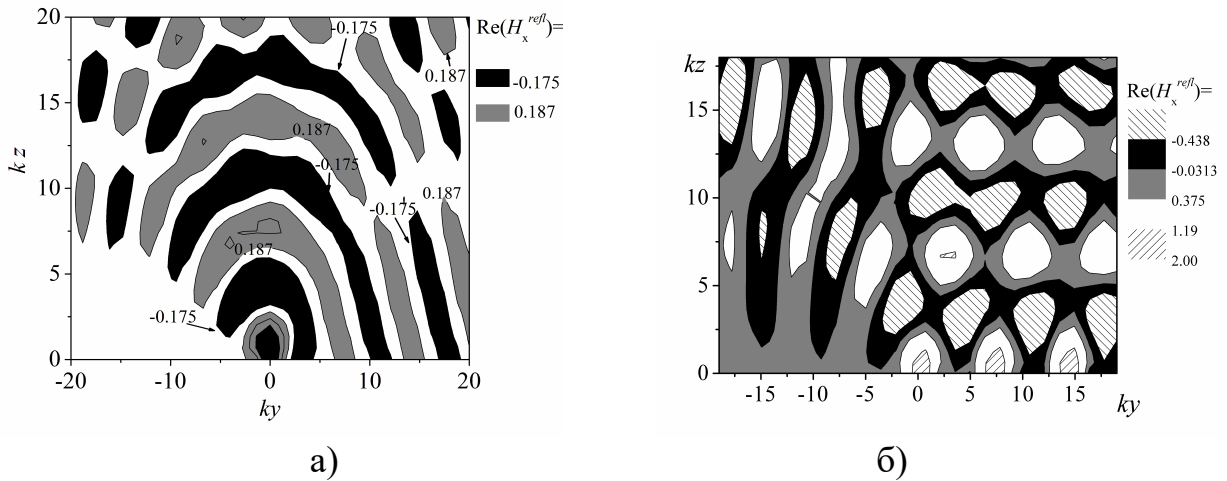


Рис.2 Відбите поле у області над решіткою з ідеально провідних стрічок, компонента $\text{Re } H_x^{\text{ref}}$, при половині ширини стрічки $d = 0.25\lambda$, ортогональному падінні $\varphi_0 = 90^\circ$. а) Решітка типу жалюзі, зсув стрічок $\Delta = 0.25\lambda$, $\Delta/h = 1.5$ (період $l = 0.3\lambda$, $\psi = 33^\circ$), б) плоска решітка ($h = 0$), $kl = 7$

З використанням методу перевалу показано, що у далекій зоні, при $k\rho \gg 1$ (k – хвильове число, ρ – відстань), розсіяне поле можна подати як суму трьох доданків. Перший доданок – це множина плоских хвиль. Його модуль не спадає при $k\rho \rightarrow \infty$. Другий доданок – циліндрична хвиля, розсіяна краєм. Його модуль спадає як $1/\sqrt{k\rho}$, при $k\rho \rightarrow \infty$. Третій доданок забезпечує неперервне асимптотичне подання поля. Досліджено поле циліндричних хвиль у далекій зоні.

З використанням побудованої моделі досліджено напівнескінченну ножову решітку, а також структуру, яка складається зі скінченноелементної та напівнескінченної решітки типу жалюзі. Завдяки вибору параметрів решітки зменшено відбиття хвилі краєм в бік опромінювача, що може бути використано у задачах маскувння об'єктів.

Самостійний інтерес становить і задача про дифракцію на ключовій неоднорідності, на плоскій решітці зі скінченної кількості ідеально провідних та імпедансних стрічок. Для її розв'язання розвивається метод сингулярних інтегральних рівнянь. При його використанні отримано сингулярне інтегральне рівняння з додатковими умовами. Існування і єдиність розв'язку, а також збіжність методу числового розв'язання, який базується на методі дискретних особливостей, алгоритмі типу Найстрема, підтверджується відповідними теоремами.

Аналіз плоскої напівнескінченної решітки (рис.1 б) виконано з використанням двох підходів. При першому підході розв'язок задачі отримано операторним методом з використанням розв'язку задачі для напівнескінченної періодичної решітки типу жалюзі, поклавши зсув стрічок вздовж перпендикулярної осі відносно площини стрічки рівним нулю, $h = 0$. При використанні другого підходу струми, що течуть стрічками, надаються як сума струмів, що течуть стрічками нескінченної ідеально періодичної решітки і струмів корекції, поява яких викликана порушенням періодичності, наявністю краю. Їх знайдено з сингулярних інтегральних рівнянь схожого вигляду як у випадку ідеально провідних стрічок, так і імпедансних. При

цьому також отримано розв'язок задачі про дифракцію на нескінченній періодичній імпедансній решітці. Досліджено електродинамічні властивості нескінченної періодичної графенової решітки.

Вплив краю описано за допомогою розсіяних циліндричних хвиль, збуджених струмами корекції. Проведено аналіз полів, розсіяних структурами, у ближній та далекій зонах для різних значень кута падіння, ширини стрічок та періоду їх розміщення. Поле, розсіяне краєм напівнескінченної періодичної решітки, впливає на характеристики структури навіть якщо коефіцієнт відбиття відповідної нескінченної періодичної решітки наближається до нуля. Показано, що суттєве зростання струмів корекції спостерігається поблизу регіону аномалії Релея-Вуда, струм корекції поширюється на більшу кількість стрічок. Досліджено ефект збудження циліндричних хвиль, розсіяних краєм, кількісно досліджено вплив краю нескінченної решітки на характеристики полів.

У випадку графенової напівнескінченної періодичної решітки, на відміну від решіток з ідеально провідних стрічок, у яких спостерігалася сильна взаємодія стрічок лише поблизу аномалій Релея-Вуда, у досліджуваній тут графеновій решітці взаємодія стрічок є помітно сильнішою як поблизу аномалії Релея-Вуда, так і поблизу плазмонних резонансів.

Виявлено положення плазмонних резонансів на частотній осі, вплив зміни хімічного потенціалу графену, ширини стрічок, періоду решітки. У випадку графенової решітки, розташованої над ідеально провідною площиною, показано, що на відміну від плоскої графенової решітки, при визначеному співвідношенні параметрів структури, поглинання практично відсутнє навіть поблизу плазмонних резонансів. З іншого боку, змінюючи відстань від площини до решітки вдається досягти практичного повного поглинання, що дозволяє прогнозувати використання досліджуваних структур у якості керованих поглиначів.

У другому розділі з використанням методу сингулярних інтегральних рівнянь досліджуються електродинамічні характеристики плоскої нескінченної стрічкової решітки з порушенням періодичності у вигляді відсутності однієї стрічки. Розсіяне поле подано як сума поля струмів, які течуть стрічками нескінченної періодичної решітки і поля корекції, викликаного відсутністю стрічки. Використовується розв'язок задачі про дифракцію плоскої хвилі на нескінченній періодичній решітці, отриманий в розділі 1. Проведено числове дослідження характеристик поля корекції, його розподіл в ближній і далекій зоні. Отримані результати розкривають закономірності його поведінки. У випадку H -поляризації максимальне збудження струмів корекції спостерігається поблизу аномалій Релея-Вуда. У полі корекції в далекій і середній зоні чітко видно головний пелюсток у випадку H -поляризації, а у випадку E -поляризації – головний пелюсток, а також і бічні пелюстки поблизу площини решітки. У випадку H -поляризації при параметрах вибраних поблизу резонансної області (найцікавіший випадок з погляду практичного застосування) головний пелюсток перевищує бічні приблизно в 10 разів. У картині поля корекції у ближній зоні максимум амплітуди поблизу відсутньої стрічки є чітко помітним, що дозволяє застосовувати побудовану модель при виявленні дефектів. Водночас, розглянута структура використовується як граничний випадок для порівняння

результатів, отриманих для більш загального випадку, – для випадку довільного зазору між двома сусідніми стрічками, який розглянуто у розділі 3.

У третьому розділі розв’язок задачі про дифракцію плоскої H -поляризованої електромагнітної хвилі на двох напівнескінченних періодичних решітках, розташованих в одній площині, з довільним зазором між ними, отримано двома методами, операторним методом і методом сингулярних інтегральних рівнянь. Геометрію структури наведено на рис.3.

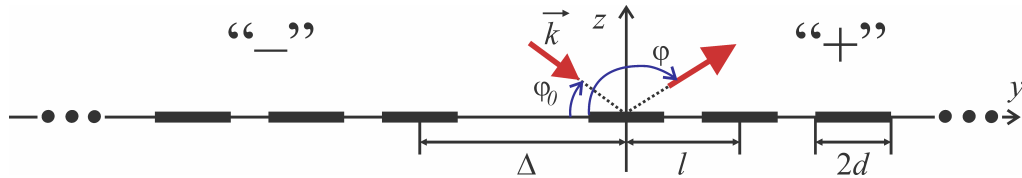


Рис.3 Геометрія двох напівнескінченних періодичних плоских решіток з довільним зазором між ними

Розглядається випадок ідеально провідних і імпедансних стрічок нульової товщини. Використовується розв’язок, отриманий в першому розділі для напівнескінченної плоскої періодичної решітки. Взаємодію двох напівнескінченних решіток, а також вплив зазору між стрічками нескінченної періодичної решітки, описано за допомогою поля корекції, збудженого струмами корекції. Розсіяне поле знайдено як суму полів, розсіяних на ізолюваних напівнескінченних решітках і поля, викликаного взаємодією напівнескінченних решіток. Отримано операторні рівняння відносно амплітуд Фур’є поля, яке описує взаємозв’язок двох напівнескінченних решіток:

$$\begin{aligned} C^+ &= -R^+ s^+ R^- s^- - R^+ C^-, \\ C^- &= -s^+ R^- s^- R^+ - s^+ R^- s^- C^+. \end{aligned}$$

Після процедури регуляризації їх зведено до гіперсингулярних інтегральних рівнянь, які містять інтеграли як у сенсі головного значення за Коші, так і у сенсі скінченної частини за Адамаром. Проведено їх дискретизацію з використанням квадратурних формул інтерполяційного типу. Тут R^\pm – оператори відбиття поодиноких напівнескінченних решіток, які розташовані при $y > 0$ і $y < 0$. Показано, що у випадку ідеально провідних стрічок глобальний максимум інтегральної характеристики струмів корекції J спостерігається при мінімальному значенні зазору, а також поблизу аномалій Релея-Вуда. В залежностях J від величини зазору Δ також спостерігається наявність локальних максимумів, розташованих періодично. Їх можна пояснити, якщо розглянути резонатор, утворений кінцями напівнескінченних решіток зі збудженням власних хвиль між ними. У випадку графенових стрічок, крім цього, максимумами спостерігаються поблизу плазмонних резонансів. На рис.4 наведено розподіл ближнього поля в області над решіткою.

Параметри структури відповідають максимумам J для частоти поблизу першого плазмонного резонансу. Результати нормуються на амплітуду падаючої хвилі. Читко помітно варіації поля стоячої хвилі, яка перевідбивається кінцями напівнескінченних решіток. В області над решіткою при $y < -\Delta$ і $y > 0$ виникають

відбиті плоскі хвилі, а область $-\Delta < y < 0$ слугує у якості перехідного регіону або регіону тіні. Струми корекції досягають свого глобального максимуму на першій стрічці поблизу зазору і далі при віддаленні від нього, $y \rightarrow \infty$, спадають. Зміна хімічного потенціалу призводить до зсуву плазмонних резонансів вздовж частотної осі. Таким чином можна контролювати ступінь взаємодії стрічок у графеновій решітці.

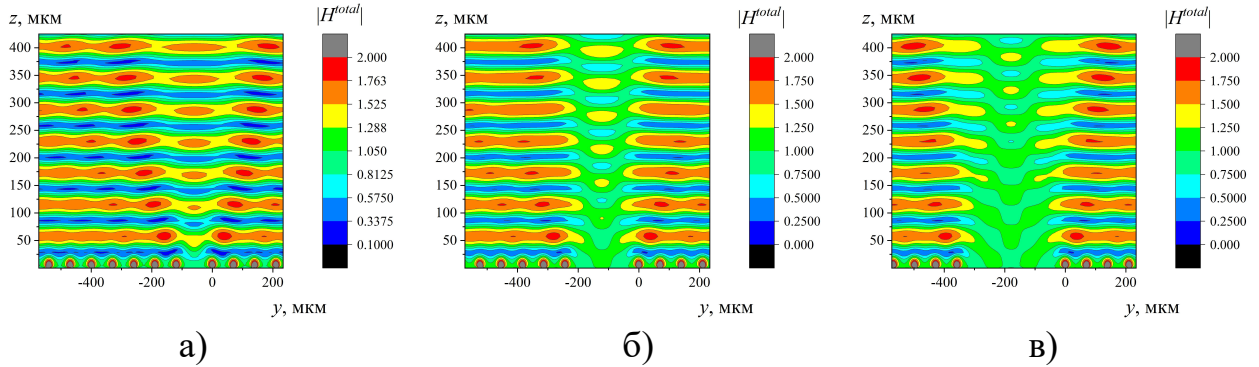


Рис.4 Розподіл повного поля $|H^{total}|$ поблизу частоти першого плазмонного резонансу графенової решітки при половині довжини стрічки $d = 10$ мкм, періоді $l = 70$ мкм, хімічному потенціалі $\mu_c = 0.4$ мкм, часі релаксації $\tau = 1$ пс, температурі $T = 300$ К. а) Зазор $\Delta = 119$ мкм, б) $\Delta = 240$ мкм, в) $\Delta = 358$ мкм

У четвертому розділі досліджено ефекти, які виникають при виключенні скінченної кількості ідеально провідних або імпедансних стрічок з двошарової нескінченної періодичної решітки у випадку падіння плоскої H -поляризованої хвилі. Задачу розв'язано двома методами, операторним методом і методом сингулярних інтегральних рівнянь. Геометрію структури наведено на рис.5. Розсіяне поле подається як сума поля струмів, які течуть стрічками періодичної двошарової решітки і поля корекції. Також додатково методом сингулярних інтегральних рівнянь отримано розв'язок задачі про дифракцію на двошаровій нескінченній періодичній решітці.

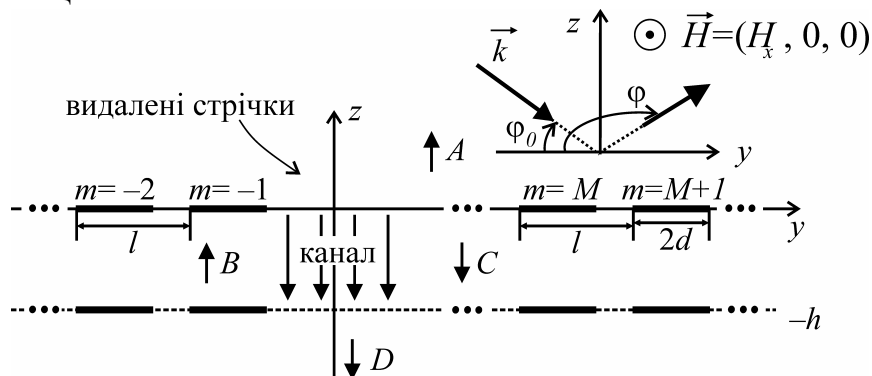


Рис.5 Геометрія досліджуваної двошарової нескінченної решітки з видаленими стрічками у кожному шарі і напрямки поширення хвиль

При записі операторних рівнянь у якості ключової неоднорідності вибрано одношарову нескінченну решітку без скінченної кількості стрічок, оператори розсіяння якої отримано з використанням результатів розділу 2.

Діаграми спрямованості поля циліндричних хвиль, яке пройшло, наведено на рис.6 для випадку ідеально провідних стрічок.

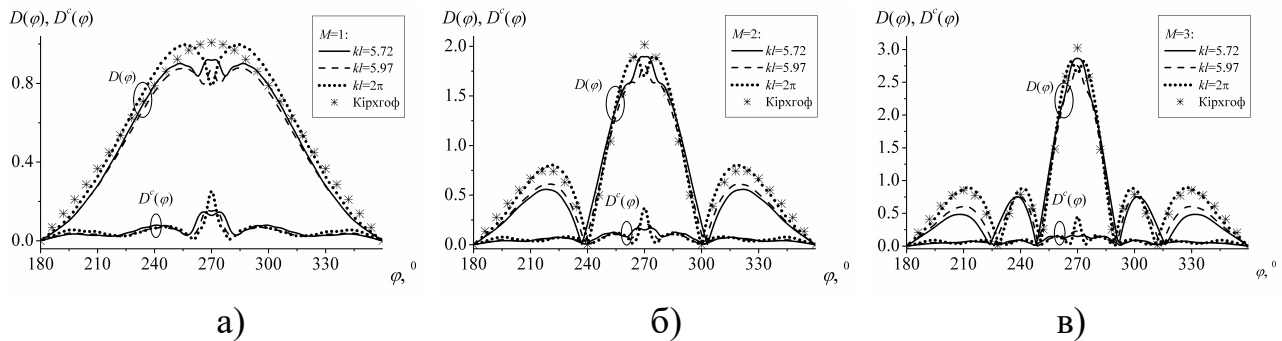


Рис.6 Діаграми спрямованості поля, яке пройшло при $kl = 5.72$ (суцільні криві), $kl = 5.97$ (штрихові криві), $kl = 2\pi$ (пунктирні криві), розв'язок Кірхгофа при $kl = 2\pi$ (зірочки), $l/d = 4$, $l/h = 2\pi$, $\varphi_0 = 90^\circ$. а) $M = 1$, б) $M = 2$, в) $M = 3$

Відомо, що у скінчених решітках у випадку падіння плоскої хвилі зі збільшенням кількості стрічок ширина головного пелюстка діаграми спрямованості наближається до 0. У граничному випадку, у випадку нескінченної періодичної решітки, діаграму спрямованості можна розглядати як дельта-функцію. Водночас, у смузі запирання коефіцієнт проходження плоскої хвилі наближається до 0. Тому поле, яке пройшло, у далекій зоні цілком описується діаграмою спрямованості $D(\varphi)$ поля циліндричних хвиль. Ці хвилі виникли в результаті проходження падаючої плоскої хвилі через хвилеводний канал, сформований відсутніми стрічками. Діаграма спрямованості у цьому випадку має відносно широкий головний пелюсток. При кількості видалених стрічок $M = 1$ ширина головного пелюстка за рівнем 0.707 становить приблизно 80° . Ця властивість може бути використана при створенні антен, ширина головного пелюстка у яких залежить від частоти. Зі збільшенням кількості виключених стрічок M ширина головного пелюстка зменшується. На рис.7 наведено діаграми спрямованості поля циліндричних хвиль, яке пройшло, для різних значень хімічного потенціалу графенових стрічок у зоні запирання двошарової нескінченної ідеально періодичної решітки.

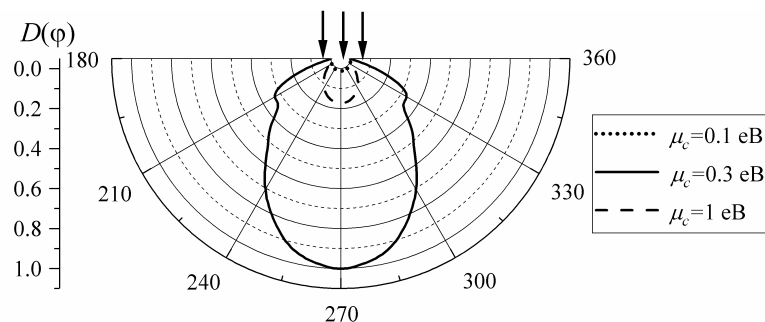


Рис.7 Діаграми спрямованості поля, яке пройшло, при $\mu_c = 0.1$ еВ (пунктирна крива), $\mu_c = 0.3$ еВ (суцільна крива), $\mu_c = 1$ еВ (штрихова крива), $f = 2.3$ ТГц, $l = 70$ мкм, $d = 10$ мкм, відстань між шарами $h = 46$ мкм, $T = 300$ К, $\tau = 1$ пс, $\varphi_0 = 90^\circ$

Показано, що при використанні графенових стрічок у решітці з'являються додаткові зони запирання поблизу плазмонних резонансів, положенням яких вздовж частотної осі, а також амплітудою поля, яке пройшло, можна керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу μ_c .

У п'ятому розділі метод сингулярних інтегральних рівнянь розвинено на скінченноелементні та нескінченні періодичні решітки з імпедансних стрічок нульової товщини, занурені у діелектричну пластину (рис.8), яка може знаходитись на ідеально провідній площині. У випадку скінченної решітки регулярна частина ядра рівнянь подається у вигляді інтегралу, підінтегральна функція якого містить особливості на дійсній осі у точках, які відповідають постійним поширення власних хвиль відповідного діелектричного хвилеводу. Для виключення особливостей проведено процедуру регуляризації. При отриманні числових результатів у якості імпедансних поверхонь обирається графен. Розглянуто випадок падіння H -поляризованої плоскої хвилі і власної хвилі відповідного діелектричного хвилеводу. Також з використанням операторного методу отримано наближений розв'язок задачі у припущенні, що взаємодія стрічок по вільному простору відсутня.

Проведено дослідження частотних залежностей характеристик розсіяння та поглинання при різних параметрах. Криві мають ярко виражений резонансний характер. Проведено ідентифікацію резонансів.

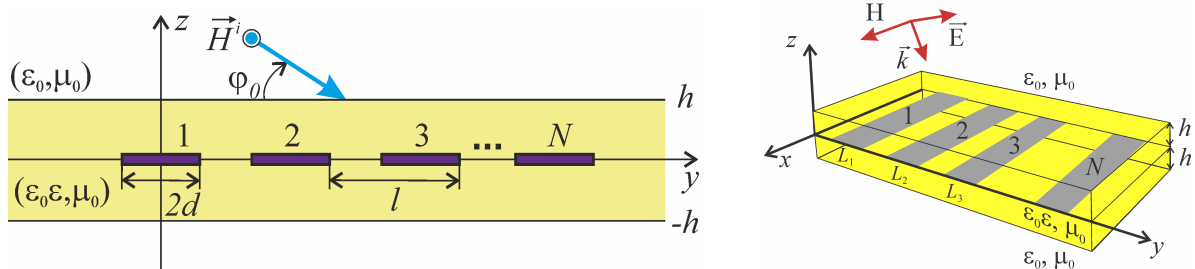


Рис.8 Геометрія структури

На рис.9, рис.10 наведено залежності перерізу розсіяння циліндричних хвиль (CS-SCS), перерізу поглинання (ACS) та перерізу розсіяння власних хвиль діелектричного хвилеводу (GW-SCS) від частоти при ортогональному падінні плоскої хвилі на решітку, занурену у діелектричну пластину ширини $h = l/2$, з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 2.25$, з ідеально провідною площиною, де період $l = 70$ мкм, половина ширини стрічок $d = 10$ мкм, час релаксації $\tau = 1$ пс, температура $T = 300$ К, кількість стрічок N .

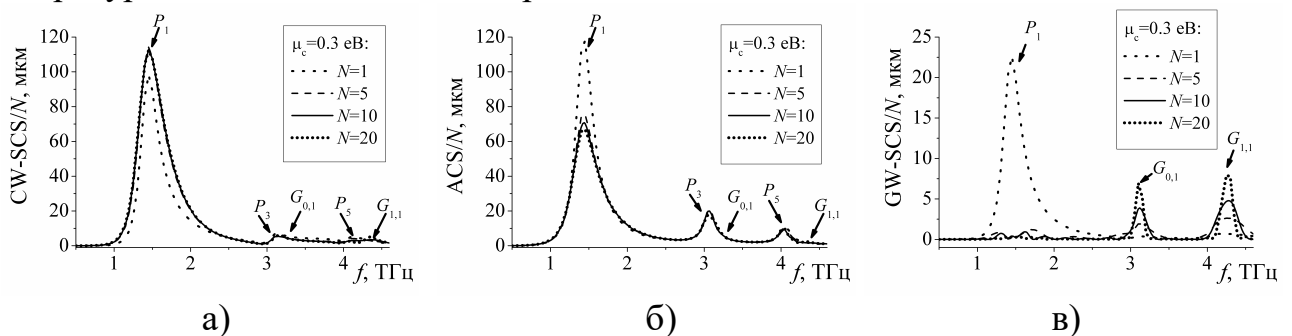


Рис.9 Залежності а) CW-SCS, б) ACS, в) GW-SCS на стрічку від частоти при $\mu_c = 0.3$ eB

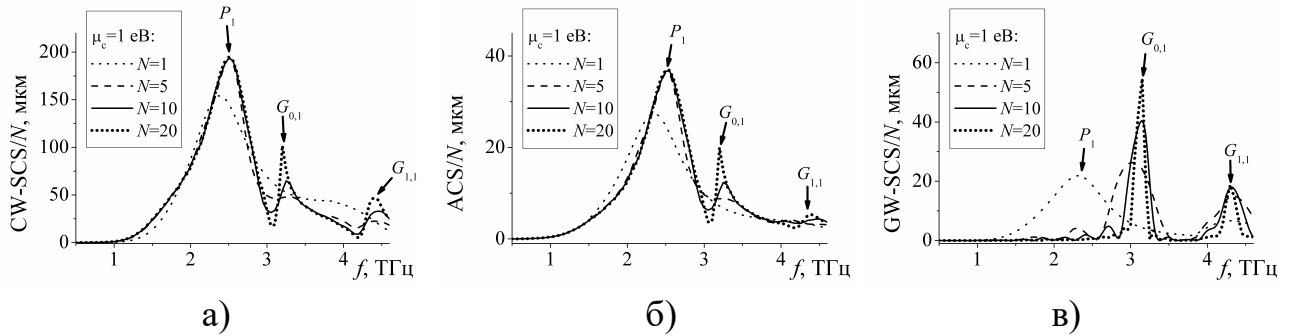


Рис.10 Залежності а) CW-SCS, б) ACS, в) GW-SCS на стрічку від частоти при $\mu_c = 1\text{eV}$

Резонанси на поверхневих плазмон поляритонних хвилях (позначені як P_i) здебільшого залежать від параметрів поодинокі графенової стрічки, таких як ширина або провідність. Їх положенням вздовж частотної осі, як наслідок і характеристиками розсіяних полів, можна керувати динамічно, за рахунок прикладення електростатичного поля, змінюючи хімічний потенціал графену. Поблизу плазмонних резонансів спостерігаються максимуми перерізу розсіяння та поглинання, максимуми випромінювання енергії з діелектричного хвилеводу, головний пелюсток діаграми спрямованості випроміненого поля досягає свого максимального значення. Положення резонансів на решіткових модах (позначені як $G_{i,j}$) здебільшого залежать від параметрів діелектричної пластини та періоду. Поблизу цих резонансів спостерігається суттєве зростання енергії, яку переносять власні хвилі діелектричного хвилеводу, суттєве зростання (при деяких параметрах майже до 1) коефіцієнта поглинання нескінченної періодичної графенової решітки у надвузькій смузі частот. Також присутні слабо виражені власні резонанси діелектричної пластини, положення яких вздовж частотної осі залежить здебільшого від її параметрів. Визначено значення параметрів, коли у разі нескінченної періодичної графенової решітки введення ідеально провідної площини приводить до значного зростання (майже до 1) коефіцієнта поглинання за рахунок багатократного перевідбиття хвилі між площиною та границею вакуум-діелектрик.

Розглянуто випадок падіння власної хвилі діелектричного хвилеводу. Діаграми спрямованості випроміненого поля демонструють тут частотно скануючий характер. Головний пелюсток діаграм спрямованості поблизу резонансів на решіткових модах $G_{i,j}$ є ортогональним до площини хвилеводу. Показано, що максимумом головного пелюстка вдається керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу графенових стрічок. При порівнянні результатів для скінченної й нескінченної періодичної решіток встановлено, що вже для декількох графенових стрічок спостерігається співпадіння частотних залежностей основних характеристик розсіювання і поглинання з графічною точністю окрім частот резонансів на решіткових модах. Тут на характеристики розсіяних полів суттєвий вплив має кількість стрічок. Проведено процедуру оптимізації параметрів на базі паралельного генетичного алгоритму. Отримано діаграми спрямованості з рівнем бічних пелюстків менше за -20 дБ і шириною головного пелюстка за рівнем -20 дБ від 13° до 25° в залежності від частоти. Розподіл поля у ближній зоні у випадку падіння

власної хвилі діелектричного хвильоводу наведено на рис.11 поблизу плазмонних резонансів (P_i) і резонансів на решіткових модах ($G_{i,j}$). У разі, коли параметри структури відповідають плазмонним резонансам, максимуми поля зосереджено поблизу стрічок, на відміну від випадку резонансів на решіткових модах.

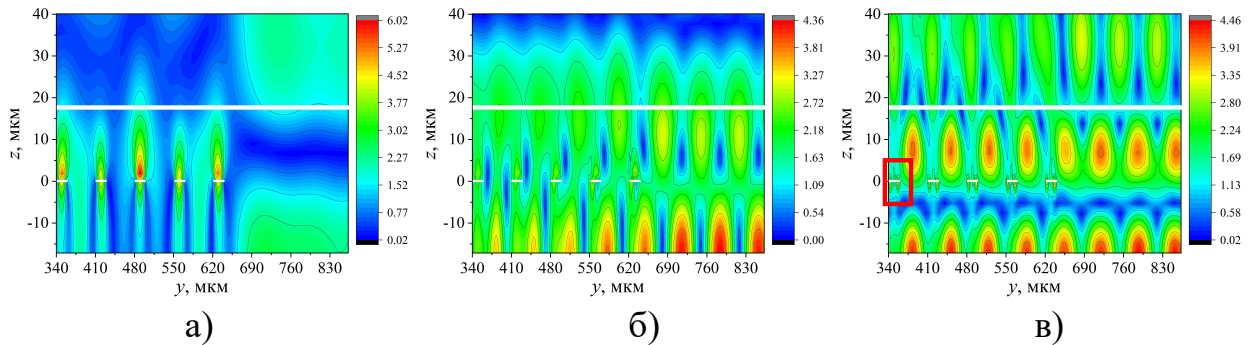


Рис.11 Розподіл повного поля ($|H_x|$) при $\mu_c = 0.6$ eВ, $d = 10$ мкм, $l = 70$ мкм, $h = l/2$, $N = 10$, $\varphi_0 = 90^\circ$, $\varepsilon = 2.25$, $\tau = 1$ пс, $T = 300$ К. а) P_1 , $f = 2.05$ ТГц, б) $G_{0,1}$, $f = 3.15$ ТГц, в) $G_{1,1}$ і P_3 , $f = 4.35$ ТГц

У шостому розділі розглянуто багатошарові решітки з імпедансних стрічок нульової товщини.

1) Скінченна та напівнескінченна періодична багатошарова система розглядається з використанням операторного методу. Кожен шар – нескінченна періодична стрічкова решітка, занурена у діелектричну пластину. Отримано систему операторних рівнянь, які є матричними. Використано оператори розсіяння поодинокій нескінченній періодичній решітці, отримані в розділі 5.

2) Для скінченної багатошарової системи скінченних решіток у вакуумі отримано два розв'язка: методом сингулярних інтегральних рівнянь і операторним методом. Використано оператори розсіяння поодинокого шару, які знайдено в розділі 1.

Важливо відмітити, що для скінченної кількості шарів операторні рівняння мають однаковий вигляд, що у разі, коли поодинокій шар є нескінченною періодичною решіткою, що у разі, коли поодинокій шар є скінченною решіткою. Використано два підходи до запису рівнянь. Перший підхід дозволяє отримати рівняння для всієї багатошарової системи в цілому. Другий використовує ітераційну процедуру. Оператори розсіяння структури, яка складається з $m+1$ шару, визначаються через оператори розсіяння структури, яка складається з m шарів.

Доведено, що операторні рівняння є еквівалентними рівнянням Фредгольма другого роду (інтегральним у випадку скінченноелементних решіток, матричним у випадку періодичних решіток). Показано, що за рахунок комбінації методу сингулярних інтегральних рівнянь, який використовується для визначення операторів розсіяння поодинокого шару, і операторних рівнянь, записаних з використанням ітераційної процедури, вдається скоротити час обчислень.

На рис.12 наведено залежності коефіцієнтів відбиття та поглинання від частоти. Плазмонні резонанси, які виникають на графенових стрічках, позначені як P_i . Зміна хімічного потенціалу приводить до зсуву плазмонних резонансів вздовж частотної осі. Збільшення кількості шарів приводить до зростання поглинання.

Коефіцієнт поглинання напівнескінченної системи майже дорівнює 1 біля плазмонних резонансів, $A \rightarrow 1$.

У розглянутих структурах присутні два типи періодичності. Перша періодичність пов'язана з періодом решітки, яка складає поодинокий шар. Тут виникають резонанси на решіткових модах, позначені як G_i . Діелектрична пластина у даному випадку діє як хвилевід. Біля цих резонансів, як і у випадку поодинокого шару, спостерігаються гострі екстремуми у частотних залежностях коефіцієнтів відбиття та поглинання, а у скінченноелементної структури – суттєве зростання потужності власних хвиль діелектричного хвилеводу. Друга періодичність пов'язана з багат шаровою системою. Резонанси власних хвиль періодичної частини багат шарової структури позначені як M_i .

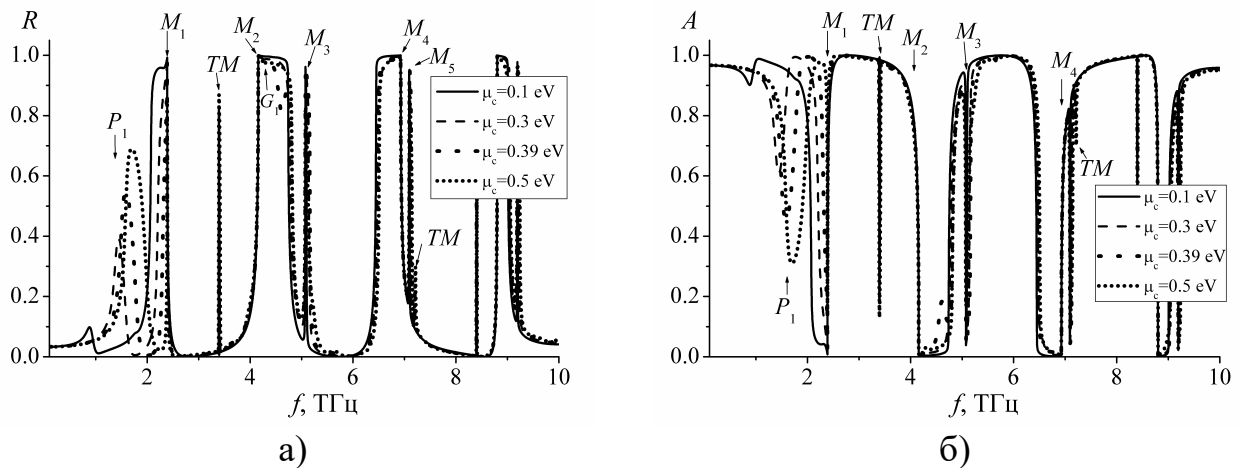


Рис.12 Залежності коефіцієнтів а) відбиття та б) поглинання від частоти напівнескінченної періодичної системи шарів, $d = 10$ мкм, $l = 70$ мкм, $L = 50$ мкм, $h = l/4 = 17.5$ мкм, $\tau = 1$ пс, $T = 300$ К, $\varphi_0 = 90^\circ$

Резонанси діелектричної пластини стають непомітними на рис.12 через більш добротні плазмонні резонанси P_i та резонанси багат шарової решітки M_i . У розглянутій структурі може збуджуватися ще одне сімейство резонансів, які позначені як TM . Вони належать до G -типу, проте ці резонанси на решіткових модах іншого типу. У разі напівнескінченної періодичної структури резонанси є набагато більш вираженими, ніж у випадку скінченно шарової структури, що полегшує задачу їх ідентифікації.

Показано, що у випадку багат шарової системи, завдяки послідовному вздовж частотної осі збудженню плазмонних резонансів і резонансів на власних хвилях періодичної частини структури, вдається збільшити ширину смуги частот, у якій спостерігається максимальне поглинання. Визначено параметри, при яких спостерігається зростання максимуму коефіцієнта поглинання завдяки одночасному збудженню резонансів.

У розділах 1-4 числово-аналітичні методи розвинено на структури, розсіяні поля в яких є суперпозицією як плоских, так і циліндричних хвиль. Наявність плоских хвиль у розсіяних полях приводила до появи полюсів у ядрах рівнянь. У наступних розділах розглянуто структури з круговою симетрією, у яких розсіяні

поля є полем сферичних хвиль, а також структури, у яких розсіяні поля є суперпозицією хвиль трьох типів – плоскої, циліндричної і сферичної.

У цьому розділі розглянуто задачу про дифракцію акустичної (скалярна задача) та електромагнітної (векторна задача) плоскої хвилі на нескінченно тонкому м'якому чи твердому або ідеально провідному кільці. Як дуальну також розглянуто задачу про дифракцію на кільцевому отворі у площині. Розсіяне поле надається як суперпозиція полів, розсіяних на диску і на круглому отворі в площині. Оператори розсіяння цих двох класичних об'єктів вважаються відомими. Амплітуди Фур'є знайдено з операторних рівнянь, які є еквівалентними інтегральним рівнянням Фредгольма другого роду.

Операторний метод розвинено на структури, розсіяні поля в яких складаються з полів плоских, циліндричних і сферичних хвиль. Окремо розв'язано три задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі. Перша – це задача про дифракцію на напівплощині і диску, які лежать в одній площині. Як дуальна до неї також розглянута задача про дифракцію на круговому отворі у напівплощині. Друга – це більш загальна задача, задача про дифракцію на напівплощині і диску, які лежать у паралельних площинах. Третя – це задача про дифракцію на напівплощині та двох дисках, які лежать у паралельних площинах (дивіться рис.13).

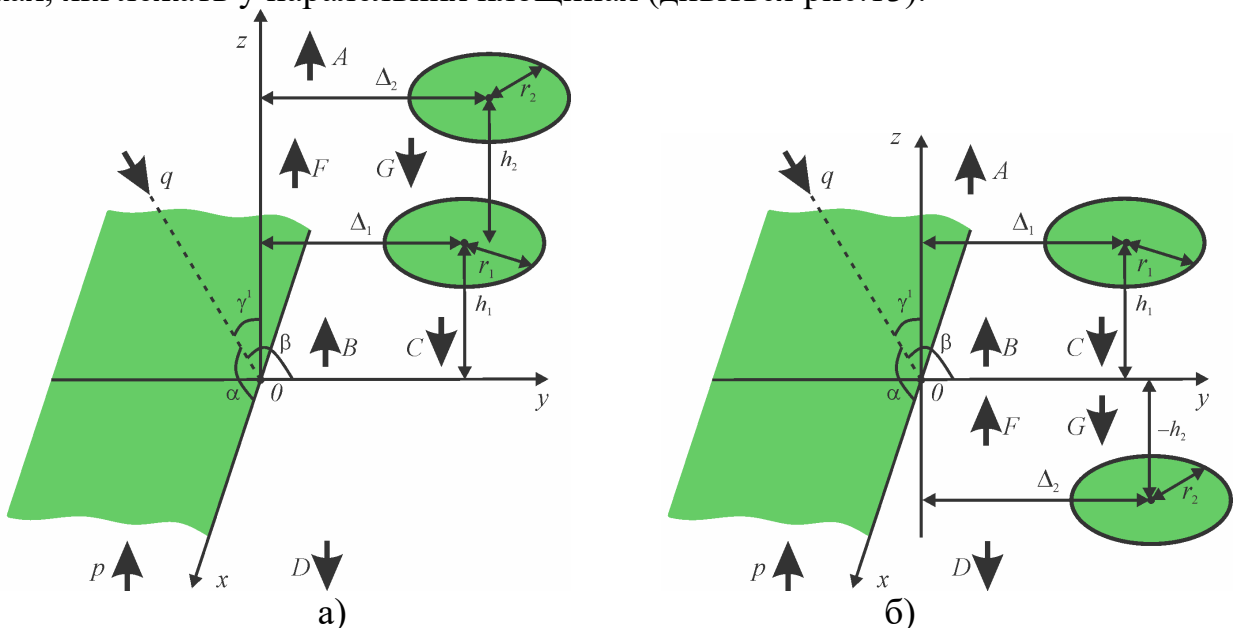


Рис.13 Геометрія досліджуваної структури. а) Диски розташовано по один бік від напівплощини. б) Диски розташовано по різні боки від напівплощини

Поля надаються у вигляді подвійних інтегралів Фур'є, суперпозиції плоских хвиль. Для амплітуд Фур'є отримано операторні рівняння. Ядра операторів мають не інтегровану особливість на дійсній осі у точці, яка відповідає постійній поширенню плоскої хвилі.

Показано, що після процедури регуляризації операторні рівняння задачі можливо звести до інтегральних, які розв'язані чисельно за допомогою дискретизації на базі квадратурних формул. Досліджено поведінку полів у ближній та далекій зонах. У роботі взаємозв'язок між напівплощиною і дисками описано за допомогою операторних рівнянь відносно амплітуди сферичних хвиль. Досліджено

випадки, коли диски знаходяться у області тіні від напівплощини, в області напівтіні та в області, що повністю освітлюється падаючою хвилею, а також знаходяться у пучностях і вузлах поля стоячої хвилі, яка виникла в результаті відбиття падаючої плоскої хвилі від нескінченної частини напівплощини. Показано, що за рахунок розсіяння плоскої хвилі на краю напівплощини поле сферичних хвиль має відмінну від нуля амплітуду навіть у випадку, якщо диски знаходяться цілком у області тіні та не освітлюються падаючою плоскою хвилею.

На рис.14, рис.15 надано розподіл повного поля у ближній зоні у випадках, коли плоска хвиля падає з області $z > 0$ і $z < 0$, поодинокий диск розташований в області $z > 0$, напівплощина – при $z = 0$, $y < 0$.

Як і у випадку напівнескінченної решітки або поодинокій ізольованій напівплощини, відбита плоска хвиля існує лише в області $y < 0$. На рис.14, рис.15 чітко видно поле відбитої плоскої хвилі в області $y < 0$, а також пучності при $kz = \pi/2 + \pi n$ і вузли при $kz = \pi n$, $n = 0, 1, 2, \dots$ або $n = 0, -1, -2, \dots$, поля стоячої хвилі. Циліндричні хвилі, які виникають за рахунок розсіяння на краях напівплощини, разом з плоскою падаючою хвилею, розсіюються диском, збуджують сферичні хвилі. Поле циліндричних і сферичних хвиль, а також перехідна область при $y = 0$, є чітко помітними.

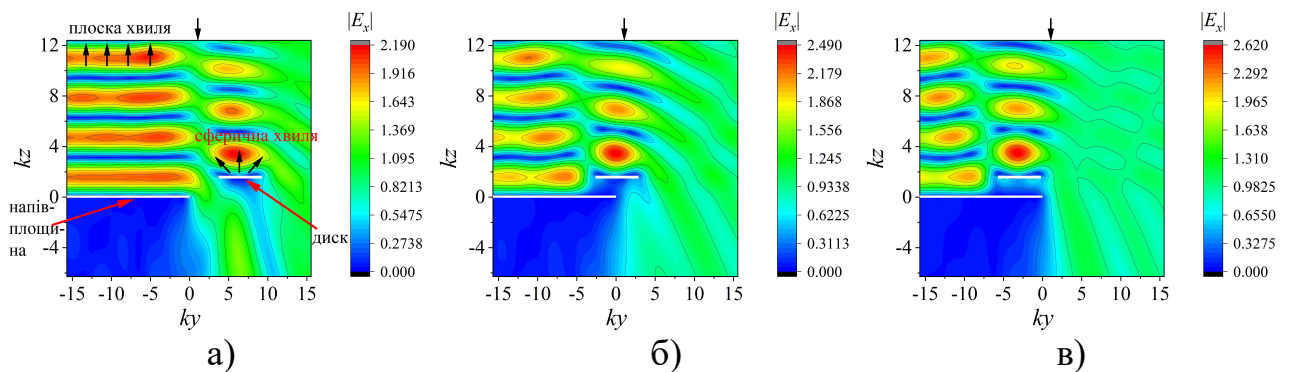


Рис.14 Розподіл повного поля, компонента $|E_x|$, у площині $x=0$ при радіусі $kr = \pi$, зсуві вздовж осі Oz $kh = \pi/2$, $q_x \neq 0$, $q_y = p_x = p_y = 0$, нормальне падіння з області $z > 0$. а) Зсув вздовж осі Oy $k\Delta = 2\pi$, б) $k\Delta = 0$, в) $k\Delta = -\pi$

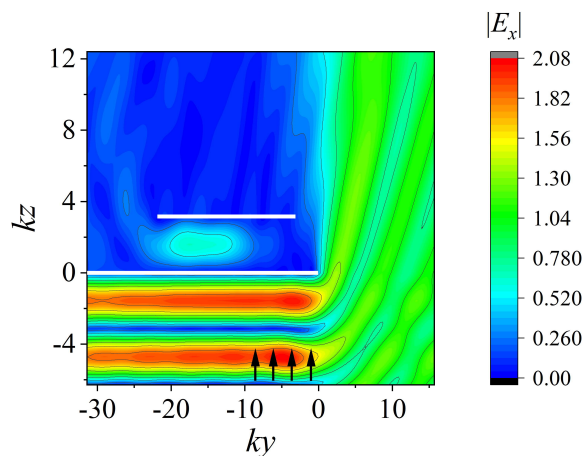


Рис.15 Розподіл повного поля, компонента $|E_x|$, у площині $x=0$ при $kr = 3\pi$, $kh = \pi$, $k\Delta = -4\pi$, $p_x \neq 0$, $q_x = q_y = p_y = 0$, нормальне падіння з області $z < 0$

У восьмому розділі в рамках єдиного підходу з використанням операторного методу побудовано строгу модель розсіяння власних хвиль H_{1m} - і E_{1m} - типу круглого хвилеводу радіусу a на скінченній та напівнескінченній періодичній системі аксіально-симетричних неоднорідностей. Хвилевід заповнено діелектриком з малими втратами. Розглянуто п'ять типів неоднорідностей: кругла діафрагма радіусу a_1 , диск радіусу a_1 , кільце з більшим та меншим радіусами a_2 і a_1 , кільцева щілина з більшим та меншим радіусами a_2 і a_1 , прямокутна гофра. Геометрію поодиноких “ключових” неоднорідностей наведено на рис.16.

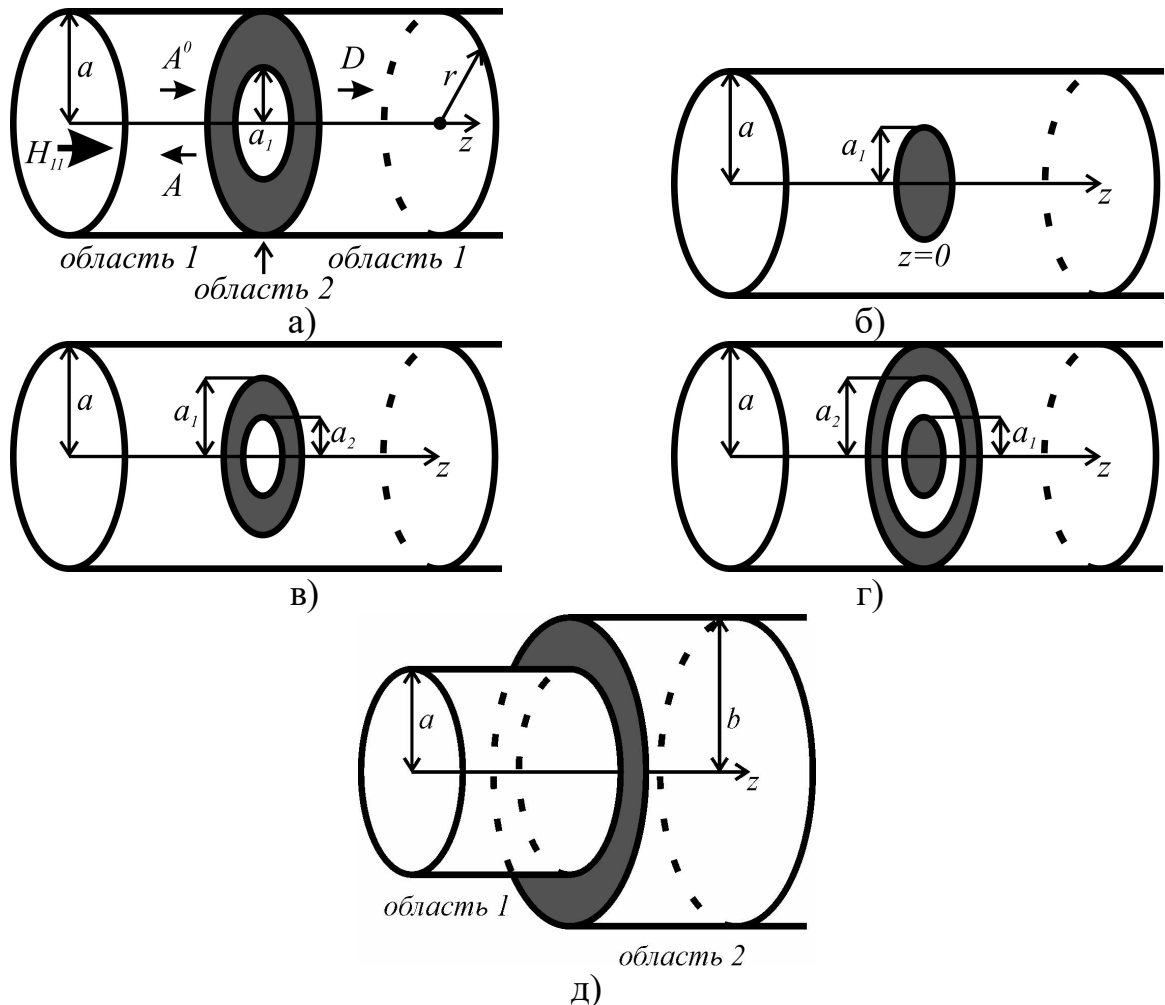


Рис.16 Геометрія поодинокієї неоднорідності. а) Кругла діафрагма, б) диск, в) кільце, г) кільцева щілина, д) ступінчаста неоднорідність

Розв'язок задачі про дифракцію на ключових неоднорідностях отримано методом моментів. Розглянуто стик скінченноелементної системи прямокутних гофр і або напівнескінченної періодичної структури, або відкритого кінця хвилеводу. Для запису операторних рівнянь відносно амплітуд Фур'є поля, розсіяного всією багатоелементною структурою, застосовано рекурентну процедуру, що дозволяє скоротити час обчислень. Досліджувалися залежності коефіцієнта відбиття від геометричних параметрів та частоти. Показано, що при наявності втрат у середовищі, властивості скінченноелементної структури наближаються до властивостей напівнескінченної при збільшенні числа розсіювачів. Досліджувалося

збудження гібридних хвиль HE_{11} - типу в гофрованому хвилеводі. Крім цього, паралельний генетичний алгоритм застосовано для оптимізації параметрів коаксіального хвилеводу з системою щілин у порожньому внутрішньому провіднику з діелектричними шайбами. Приділено увагу проведенню паралельних обчислень з передачею інформації по локальній мережі, а також збереженню отриманої інформації у пам'яті задля її використання при наступних ітераціях процесу, що дозволяє зберегти комп'ютерний час.

У висновках подано основні результати дисертаційної роботи.

У додатка наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, вирази для полів, коефіцієнтів і функцій, які виникають у рівняннях розглянутих задач.

ВИСНОВКИ

Результати досліджень, які надано в даній роботі, отримано в рамках нового наукового напрямку в радіофізиці – створення нових штучних з унікальними електродинамічними характеристиками матеріалів (метаматеріалів), не існуючих у природних середовищах і дослідження їх параметрів. Мета дисертації полягала, по-перше, в розвитку чисельно-аналітичних методів, на базі яких можливо створення максимально узагальнюючих моделей для дослідження явища дифракції електромагнітних та акустичних хвиль на неоднорідностях складнокомпозиційної структури. По-друге, – в виявленні нових фізичних ефектів і закономірностей, спостерігаємих при взаємодії падаючих хвиль з системами неоднорідностей у вигляді плоских ідеально провідних та імпедансних екранів, розміщених у вільному просторі, в діелектричному середовищі з втратами, в плоских діелектричних хвилеводах й інших хвилеведучих структурах. Автором було запропоновано та всебічно досліджено оригінальні фізико-математичні моделі взаємодії хвиль різної природи з нескінченними, напівнескінченими періодичними структурами, періодичними структурами з різного роду дефектами у періодичності, аперіодичними, у яких були присутні як ідеально провідні, так і розсіювачі з імпедансними границями (в тому числі, графенові).

Основні результати дослідження можна сформулювати так:

- розвинено чисельно-аналітичні методи для розв'язання крайових задач, на основі яких запропоновано максимально узагальнюючі моделі й ефективні алгоритми з використанням сучасних комп'ютерних технологій для всебічного дослідження явища дифракції хвиль на різного роду неоднорідностях з довільною топологією та матеріальними параметрами, дозволяючими на строгому електродинамічному рівні знаходити характеристики розсіяних полів;

- встановлено нові закономірності взаємодії таких електродинамічних структур з падаючими полями різної природи.

Ці два аспекти базуються на основних отриманих результатах.

Вперше отримано розв'язок задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на напівнескінченній періодичній стрічковій решітці типу жалюзі. Показано, що властивості решітки можна знайти з нелінійного операторного рівняння, яке, після дискретизації і регуляризації сингулярних інтегралів, можливо розв'язати чисельно з використанням ітераційної процедури з параметром релаксації та методу Зейделя.

Вперше для розв'язання задачі про дифракцію хвиль на плоскій напівнескінченній періодичній стрічковій решітці у випадку E - і H - поляризації застосовано метод сингулярних інтегральних рівнянь.

Показано, що у випадку H - поляризації властивості напівнескінченної періодичної решітки типу жалюзі наближаються до властивостей плоскої напівнескінченної періодичної решітки при куті повороту стрічок $\psi \rightarrow 0^0$. Таким чином показано, що метод, розвинений для аналізу напівнескінченної періодичної решітки типу жалюзі, також можна застосувати і для аналізу плоскої напівнескінченної періодичної решітки. З використанням отриманого алгоритму проведено дослідження електродинамічних властивостей напівнескінченної ножевої решітки, отримано розв'язок задачі про дифракцію на напівнескінченній стрічковій решітці у поєднанні зі скінченною решіткою. Розвинені методи дозволили вивчити вплив краю на характеристики розсіяних полів. Показано, що за рахунок введення додаткової плоскої стрічкової решітки в область над напівнескінченною решіткою типу жалюзі вдається суттєво зменшити відбиття циліндричної хвилі, збудженої за рахунок наявності краю, в бік опромінювача. Амплітуда відбитого поля предканторовою напівнескінченною ножевою решіткою є значно меншою за амплітуду відбитого поля напівнескінченною ножевою решіткою у разі, коли кожен шар – це одноелементна плоска решітка.

Для аналізу плоскої напівнескінченної періодичної стрічкової решітки розвинено два абсолютно різні підходи. При використанні першого підходу розсіяне поле було надано як сума поля струмів, які течуть стрічками нескінченної ідеально періодичної решітки і струмів корекції, збуджених за рахунок наявності краю. Ці струми знайдено у результаті розв'язання сингулярних інтегральних рівнянь. При використанні другого підходу отримано операторні рівняння відносно амплітуд Фур'є розсіяного поля. Тут використовується трансляційна симетрія напівнескінченної періодичної структури.

Вперше знайдено строгий розв'язок задач про дифракцію H - і E -поляризованої хвилі на нескінченній періодичній решітці без однієї стрічки. Отримані результати, на відміну від наближених асимптотичних, наприклад на основі розв'язку Кірхгофа, дозволяють у строгій формі описати струми корекції, які виникають за рахунок дефекту у періодичності. Розв'язок цієї задачі може слугувати у якості граничного випадку для порівняння з розв'язком у більш загальному випадку, коли зазор між двома стрічками є довільним.

Вперше отримано розв'язок задачі про дифракцію на нескінченних імпедансних решітках зі стрічок нульової товщини з порушенням періодичності: на напівнескінченній періодичній решітці, решітці з порушенням періодичності у вигляді відсутності елемента, зсуву стрічок, двошаровій нескінченній решітці з порушенням періодичності у вигляді відсутності скінченної кількості стрічок у кожному шарі. Вперше строгими методами розглянуто графенові стрічкові решітки з порушенням періодичності. Використання таких новітніх матеріалів, як графен, провідність якого залежить від хімічного потенціалу і може бути змінена динамічно, дозволяє додати ступені свободи і ефективно керувати характеристиками розсіяних полів, формуючи електромагнітні поля з заданими характеристиками, прогнозувати створення настроюваних пристроїв, в тому числі й у перспективному ТГц діапазоні.

Вперше отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію H -поляризованої хвилі на двошаровій нескінченній періодичній решітці у відсутності скінченної кількості стрічок у кожному шарі. Встановлено, що плоска хвиля може проходити крізь хвилеводний канал, сформований відсутніми стрічками, у область поза решіткою навіть у зоні запирання відповідної нескінченної ідеально періодичної структури, збуджуючи циліндричну хвилю. Показано, що при використанні графенових стрічок значенням максимуму головного пелюстка можна керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу. Ця властивість є основою для створення антен з частотно керованою шириною та динамічно керованим максимумом головного пелюстка.

Запропоновані моделі дозволили кількісно вивчити електромагнітний взаємозв'язок як ідеально провідних, так і імпедансних стрічок нульової товщини у періодичних решітках. У випадку E -поляризації взаємозв'язок стрічок у нескінченних періодичних стрічкових решітках поблизу області аномалії Релея-Вуда є значно слабшим, ніж у випадку H -поляризації. Видалення з нескінченної ідеально періодичної решітки однієї стрічки не призводить до суттєвого зростання густини струмів корекції у випадку E -поляризації поблизу зон аномалій Релея-Вуда. Зовсім інша ситуація спостерігається для напівнескінченної решітки, коли густина струмів корекції на стрічках суттєво зростає як у випадку E -поляризації, так і у випадку H -поляризації. У випадку графенової напівнескінченної періодичної решітки, на відміну від решіток з ідеально провідних стрічок, у яких спостерігалася їх сильна взаємодія лише поблизу аномалій Релея-Вуда, тут взаємозв'язок є помітно сильнішим як поблизу аномалії Релея-Вуда, так і поблизу плазмонних резонансів. Більше того, максимумами поблизу плазмонних резонансів є набагато більш вираженими. За рахунок зміни хімічного потенціалу графену можна контролювати ступінь взаємозв'язку стрічок у решітці.

Побудовано фізично коректні моделі випромінюючих, поглинаючих систем, хвилеводних збуджувачів, які складаються з імпедансних розсіювачів, проведено оптимізацію їх параметрів.

Вперше методом сингулярних інтегральних рівнянь отримано розв'язки задач про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на скінченних, нескінченних періодичних одношарових та багатошарових решітках з імпедансних стрічок нульової товщини. При аналізі фізичних результатів обрано графенові стрічки. Виявлено положення плазмонних резонансів на частотній осі, вплив на нього хімічного потенціалу графену, ширини стрічок, періоду решітки. У випадку графенової решітки, розташованої над ідеально провідною площиною, показано, що на відміну від плоскої графенової решітки, при визначених значеннях параметрів структури, поглинання практично відсутнє навіть поблизу плазмонних резонансів. З іншого боку, змінюючи відстань від площини до решітки, вдається досягти практичного повного поглинання падаючої плоскої хвилі. За рахунок зміни значень хімічного потенціалу графенових стрічок положенням плазмонних резонансів і, як наслідок, зони поглинання вздовж частотної осі вдається керувати. Зміна хімічного потенціалу практично не призводить до зсуву резонансів на решіткових модах вздовж частотної осі, проте дозволяє контролювати рівень енергії, яка є випроміненою з діелектричного хвилеводу, а також амплітуду збуджених власних

хвиль хвилеводу. Показано, що за рахунок надання кожній стрічці значення хімічного потенціалу не залежно від інших стрічок, після проведення процедури оптимізації, вдається зменшити рівень бічних пелюстків і зменшити ширину головного пелюстка діаграми спрямованості. Проведено процедуру оптимізації параметрів на базі паралельного генетичного алгоритму. Отримано діаграми спрямованості з рівнем бічних пелюстків менше за -20 дБ і шириною головного пелюстка за рівнем -20 дБ від 13° до 25° в залежності від частоти. Окрім теоретичної цінності результатів стосовно фундаментальних закономірностей взаємодії електромагнітних полів з графеновими решітками, вони являють і практичну цінність, вказуючи на перспективність застосування розглянутих структур у перестроюваних поглиначах, антенах з настроюваним рівнем випромінювання, а також збуджувачів власних хвиль діелектричного хвилеводу.

Доведено, що операторні рівняння задач про дифракцію на скінченній багатошаровій системі скінченних стрічкових решіток є еквівалентними до інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду. Запропонований підхід з використанням операторного методу у сукупності з методом сингулярних інтегральних рівнянь дозволив суттєво скоротити час обчислень. Так, у припущенні, що системи лінійних алгебраїчних рівнянь розв'язуються методом Гауса, при використанні лише методу сингулярних інтегральних рівнянь час обчислень є пропорційним до $t \sim (Mnp)^3$. При використанні методу сингулярних інтегральних рівнянь у поєднанні з операторними рівняннями, записаними з застосуванням ітераційної процедури, час обчислень є пропорційним до $t \sim (Np)^3 + 2Mq^3$, де N – число стрічок у кожному шарі, M – число шарів, p і q – кількість вузлів у квадратурних формулах. Показано, що використання моделі напівнескінченної періодичної системи шарів полегшує ідентифікацію резонансів. Встановлено значення параметрів структури, при яких спостерігається розширення смуги, в якій досягається максимум поглинання, порівняно з випадком одношарової решітки.

У рамках єдиного підходу вперше операторним методом отримано строгий розв'язок задач про дифракцію плоскої акустичної та електромагнітної хвилі на нескінченно тонкому ідеально провідному кільці або кільцевому отворі у площині. Вперше отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію електромагнітних хвиль на системі, яка складається з напівплощини та дисків. Операторний метод тут розвинено на структури, розсіяні поля у яких є суперпозицією плоских, циліндричних та сферичних хвиль. Доведено, що операторні рівняння можна звести до інтегральних рівнянь, які, після проведення процедури регуляризації, в свою чергу, можна дискретизувати з використанням квадратурних формул і розв'язати чисельно. Показано, що за рахунок розсіяння плоскої хвилі на краю напівплощини поле сферичних хвиль має відмінну від нуля амплітуду навіть у випадку, якщо диски знаходяться цілком у області тіні та не освітлюються падаючою плоскою хвилею.

В рамках єдиного, розвиненого у роботі підходу, з використанням операторного методу побудовано строгую модель розсіяння власних хвиль типу H_{1m} - і E_{1m} - на системі аксіально-симетричних неоднорідностей у круглому хвилеводі. Розв'язок ключової задачі отримано методом часткових областей у поєднанні з

методом моментів. Розглянуто як скінченну, так і напівнескінченну періодичну послідовність. Використання ітераційної процедури запису рівнянь дозволяє скоротити час обчислень. Запропонований метод оптимізації на базі генетичного алгоритму дозволив скоротити час розрахунків завдяки здійсненню паралельних обчислень і за рахунок збереження в пам'яті операторів розсіяння вже розглянутих неоднорідностей.

Вірність отриманих результатів підтверджується декількома фактами. По-перше, для низки задач в дисертації розв'язок отримано різними методами. Проведено порівняння результатів. По-друге, у деяких граничних випадках проведено порівняння з результатами, відомими з літератури або отриманими відомими методами, з результатами, отриманими на базі асимптотичних розв'язків, а також з результатами, отриманими в комерційних пакетах. По-третє, вірність результатів підтверджується числовою перевіркою виконання граничних умов, закону збереження енергії та відповідністю фізичним закономірностям.

Методи, розвинені у дисертації, є строгими. Збіжність наближеного розв'язку, отриманого в результаті дискретизації рівнянь, редукції матриць, до точного базується на відповідних теоремах. Для підтвердження факту збіжності, а також для виявлення швидкості збіжності, у кожному випадку проведено числове дослідження відносної похибки при зміні параметрів. Показано, що для скінченно-елементних структур похибка розв'язку спадає з алгебраїчною швидкістю. При дослідженні збіжності ітераційного процесу розв'язку нелінійного операторного рівняння у задачі про дифракцію плоскої хвилі на напівнескінченних решітках виявлено, що залежності похибки від числа ітерацій можуть мати осциляції з неспадаючою амплітудою. Для того, щоб досягти збіжності процесу було введено параметр релаксації, зміна значень якого також впливає на швидкість збіжності. Операторні рівняння отримано в роботі з використанням єдинообразної процедури їх запису. Сингулярні інтегральні рівняння з додатковими умовами, отримані для розглянутих в дисертації задач, мають єдиний вигляд, що дозволяє застосувати єдину схему їх дискретизації, дозволяють уніфікувати розв'язання низки задач про дифракцію.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Калиберда М. Е., Погарский С. А. Операторный метод в задачах дифракции волн на неоднородностях. Lambert Academic Publishing, 2014. 108 с. ISBN 978-3-659-64070-4

Внесок здобувача: постановка та розв'язання граничних задач, комп'ютерне моделювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

2. Литвиненко Л. Н., Просвирнин С. Л., Погарский С. А., Калиберда М. Е. Дифракция волн на периодических многослойных структурах. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2017. 268 с.

Внесок здобувача: розв'язання задач дифракції на структурах, розсіяні поля у яких мають одночасно дискретний та неперервний спектр, розв'язання задач дифракції на системах перехід у хвилеводах, оптимізація параметрів, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

3. Калиберда М. Е., Литвиненко Л. Н., Погарский С. А. Моделирование графеновых решеток методами интегральных уравнений. Lambert Academic Publishing, 2018. 108 с. ISBN 978-613-9-89111-5.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання граничних задач, комп'ютерне моделювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

4. Lytvynenko L.M., Prosvirnin S.L., Pogarsky S.A., Kaliberda M.E. Wave diffraction by periodic multilayer structures. Second Edition. Cambridge: Cambridge Scientific Publishers. 2021. 272 p.

Внесок здобувача: розв'язання задач дифракції на структурах, розсіяні поля у яких мають одночасно дискретний та неперервний спектр, розв'язання задач дифракції на системах перехід у хвилеводах, оптимізація параметрів, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

5. Каліберда М.Є., Погарський С.О., Білоусов В. А. Дифракція аксиально-симетричних хвиль на обмеженій та напівнескінченній послідовності гофр у круглому хвилеводі. Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник. 2011. Вип. 167. С. 10-13.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

6. Каліберда М. Є., Погарський С. О., Білоусов В. А. Операторний метод у задачі випромінення з відкритого кінця круглого гофрованого хвилеводу. Радіофізика і радіоастрономія. 2012. Т. 17, № 1. С. 74-80.

Переклад англійською:

Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Belousov V. A. Operator method in the problem of radiation from an open end of a circular corrugated waveguide. Radio Physics and Radio Astronomy. 2012. Vol. 3, № 3. P. 259-264. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i3.90

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

7. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Паралельний генетичний алгоритм у задачі оптимізації параметрів фільтра на основі коаксіального хвилеводу з системою щілин в порожнистому внутрішньому провіднику. Радіофізика і радіоастрономія. 2012. Т. 17, № 4. С. 362-368.

Внесок здобувача: постановка задачі, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

8. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Wave diffraction by semi-infinite periodical multielement knife-type strip grating of fractals. Вісник Дніпропетровського університету. Серія "Фізика. Радіоелектроніка". 2014. Вип. 21. Т. 22, № 1. С. 139-148.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

9. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод у задачі про взаємодію напівнескінченної решітки типу жалюзі та скінченної решітки зі

стрічок. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2015. Т. 20, № 4. С. 322-339. DOI: 10.15407/rpra20.04.332

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

10. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Дифракція Е-поляризованої хвилі на нескінченній періодичній стрічковій решітці за відсутністю однієї стрічки. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2016. Т. 21, № 3. С. 189-197. DOI: 10.15407/rpra21.03.189

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

11. Калиберда М.Е., Погарский С.А., Рюк М.П., Ильина Т.А. Дифракция волны на плоской графеновой решетке, расположенной над идеально проводящей плоскостью. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2017. Вип. 27. С. 49-52.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

12. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод у скалярній задачі дифракції на аксіально-симетричних неоднорідностях в екрані. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2018. Т. 23, № 1. С. 36-42.

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

13. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод в задачі дифракції хвиль на напівнескінченній графеновій решітці. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2019. Вип. 196. С. 112-116.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

14. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Дифракція Н-поляризованої хвилі на плоскій графеновій решітці типу жалюзі. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2019. Вип. 197. С. 38-42.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

15. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод у задачі про дифракцію Н-поляризованої плоскої хвилі на двошаровій нескінченній періодичній стрічковій решітці за відсутності однієї стрічки у кожному шарі. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2020. Т.25, №2. С. 136-146. DOI: 10.15407/rpra25.02.136

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

Наукові праці у фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS:

16. Lytvynenko L. M., Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Wave diffraction by semi-infinite venetian blind type grating. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 61. No. 12. P. 6120-6127. DOI: 10.1109/TAP.2013.2281510

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

17. Kaliberda M.Ye., Pogarsky S.A., Ulyankin Ye.Ye. Electrodynamics characteristics of a coaxial hollow inner conductor waveguide with a system of axially symmetric nonperiodically arranged inhomogeneities. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, no. 7. P. 577-583. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i7

Переклад статті:

Каліберда М. Є., Погарський С. О., Ульянов Є. Є. Електродинамічні характеристики коаксіального хвилеводу з порожнім внутрішнім провідником з системою аксіально-симетричних неперіодично розташованих неоднорідностей. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2014. вип. 177. С. 109-113.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

18. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. N., Pogarsky S. A. Diffraction of H-polarized electromagnetic waves by a multi-element planar semi-infinite grating. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, no. 9. P. 753-767. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i9.10

Переклад статті:

Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Дифракція Н-поляризованої електромагнітної хвилі на багатоеlementній плоскій напівнескінченній решітці. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2014. Т. 19, № 4. С. 348-357. DOI: 10.15407/rpra19.04.348

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

19. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations in diffraction problem by an infinite periodic strip grating with one strip removed. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2016. Vol. 30, no. 18. P. 2411-2426. DOI: 10.1080/09205071.2016.1254071

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

20. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Poznyakov A. V. Analysis of periodic gratings with defects in the form of absence of a single strip. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, no. 6. P. 461-467. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i6.10

Переклад статті:

Каліберда М. Є., Погарський С. О., Позняков А. В. Аналіз дефектів періодичній решітці у вигляді відсутньої однієї стрічки. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2016. Вип. 187. С. 74-78.

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

21. Kaliberda M., Lytvynenko L., Pogarsky S. Method of singular integral equations in diffraction by semi-infinite grating: H -polarization case. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2017. Vol. 25. P. 4496-4509. DOI: 10.3906/elk-1703-170.

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

22. Kaliberda M., Pogarsky S. Operator methods in the problem of wave diffraction by two graphene strips located within parallel planes. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, no. 13. P. 1141-1147.

Переклад статті:

Каліберда М. Є., Погарський С. О. Операторний метод в задачі дифракції хвиль на двох графенових смужках, розташованих у паралельних площинах. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2017. Вип. 188. С. 12-15.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

23. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations in diffraction problem by an infinite periodic strip grating with one strip removed: E-polarization case. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2018. Vol. 32, no. 3. P. 332-347. DOI: 10.1080/09205071.2017.1383943.

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

24. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Modeling of graphene planar grating in the THz range by the method of singular integral equations. *Frequenz*. 2018. Vol. 72, no. 5-6. P. 277-284. DOI: 10.1515/freq-2017-0059.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

25. Kaliberda M., Lytvynenko L., Pogarsky S. Singular integral equations in diffraction by multilayer grating of graphene strips in the THz range. *The European Physical Journal Applied Physics (EPJ Applied Physics)*. 2018. Vol. 82, no. 2. P. 21301. DOI: 10.1051/epjap/2018170324

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

26. Kaliberda M., Lytvynenko L., Pogarsky S. Simulation of infinite periodic graphene planar grating in the THz range by the method of singular integral equations. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2018. Vol. 26, no.4. P. 1724-1735. DOI: 10.3906/elk-1712-92

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

27. Kaliberda M., Lytvynenko L., Pogarsky S. Method of singular integral equations in diffraction by semi-infinite grating: E-polarization case. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2018. Vol. 26, no.5. P. 2406-2416. DOI: 10.3906/elk-1802-19

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

28. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Diffraction of the H-polarized plane wave by a finite layered graphene strip grating. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2019. Vol.11, no.4. P. 326-333. DOI: 10.1017/S1759078718001290

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

29. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Electromagnetic interaction of two semi-infinite coplanar gratings of flat PEC strips with arbitrary gap between them. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2019. Vol. 33, no.12. P. 1557-1573. DOI: 10.1080/09205071.2019.1615996.

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

30. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations analysis of THz wave scattering by an infinite graphene strip grating embedded into a grounded dielectric slab. *Journal of the Optical Society of America A (JOSA A)*, 2019. Vol. 36, no. 10. P. 1787-1794. DOI: 10.1364/JOSAA.36.001787

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

31. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. THz waves scattering by finite graphene strip grating embedded into dielectric slab. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2020. Vol. 56, no.1. P. 8500107. DOI: 10.1109/JQE.2019.2950679

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

32. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Scattering of the H-polarized plane wave by finite and semi-infinite multilayer systems of infinite graphene strip gratings in the THz range. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2020. Vol.12, no.5. P.380-386. DOI: 10.1017/S1759078719001430

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

33. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations in THz plane wave scattering by graphene semi-infinite grating. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. Vol. 79, no. 9. P. 731-742. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i9

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

34. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Method of singular integral equations in scattering by double-layer infinite strip grating with several strips removed in every layer. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2021. Vol. 35, no. 11. P. 1433-1447. DOI: 10.1080/09205071.2021.1893833

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

35. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations in plane wave scattering by infinite graphene strip grating with brake of periodicity. *Frequenz*. 2021. Vol. 75, no. 7-8. P. 239-249. DOI: 10.1515/freq-2020-0030

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

36. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A., Sauleau R. Excitation of guided waves of grounded dielectric slab by a THz plane wave scattered from finite number of embedded graphene strips: Singular integral equation analysis. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 15. P. 1171-1180. DOI: 10.1049/mia2.12120

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

37. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Scattering of eigenmodes of planar dielectric waveguide with PEC wall by graphene strip grating at THz. *Waves in Random and Complex Media*. 2024. Vol. 34, no. 3. P. 1389-1406. DOI: 10.1080/17455030.2021.1938287

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

38. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод в задачі про дифракцію Н-поляризованої хвилі на двох однакових напівнескінчених решітках, розташованих в одній площині. *Радіофізика і радіоастрономія (Operator method in the problem of the H-polarized wave diffraction by two semi-infinite gratings placed in the same plane. Radio Physics and Radio Astronomy)*. 2021. Т. 26, №3. С. 239-249. DOI: 10.15407/rpra26.03.239

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

39. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Singular integral equations in scattering of planar dielectric waveguide eigenwaves by the system of graphene strips at THz. *Plasmonics*. 2022. Vol.17. P. 505-517. DOI: 10.1007/s11468-021-01511-9

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

40. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод в задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на кільцевій щілині в площині або на кільці. *Радіофізика і радіоастрономія (Operator method in the problem of a plane electromagnetic wave diffraction by an annular slot in the plane or by a ring. Radio Physics and Radio Astronomy)*. 2021. Т. 26, №4. С. 350-357. DOI: 10.15407/rpra26.04.350

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

41. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Electromagnetic wave scattering by half-plane and disk placed in the same plane or circular hole in half-plane. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2022. Vol. 36, no. 10. P. 1463-1483. DOI: 10.1080/09205071.2022.2032379

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

42. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Scattering by PEC half-plane and disk placed on parallel planes. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2023. Vol. 15, no.2. P. 311-312. DOI: 10.1017/S1759078722000472

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

43. Каліберда М. Є., Литвиненко Л. М., Погарський С. О. Операторний метод в задачі про дифракцію хвиль круглого хвилеводу на аксіально симетричних неоднорідностях. *Радіофізика і радіоастрономія (Operator method in diffraction problem of waves of circular waveguide by the annular discontinuities. Radio Physics and Radio Astronomy)*. 2022. Т. 27, №1. С. 5-16. DOI: 10.15407/rpra27.01.005

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

44. Каліберда М. Є., Литвиненко Л.М., Погарський С. О. Операторний метод у задачі про дифракцію плоскої хвилі на нескінченно тонких ідеально провідних напівплощині та двох дисках. *Радіофізика і радіоастрономія (An operator method for*

the problem of plane wave diffraction by infinitely thin, perfectly conducting half-plane and two disks. *Radio Physics and Radio Astronomy*). 2022. Т. 27, №3. С. 167-180. DOI: 10.15407/rpra27.03.167

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

Наукові праці у фахових закордонних виданнях:

45. Kaliberda M.E., Pogarsky S.A. Solution of the diffraction problem by the semi-infinite grating with modified end with the help of singular integral equations apparatus. *Waves, Wavelets and Fractals*. 2018. Vol. 4, no. 1. P. 1-9. DOI: 10.1515/wwfaa-2018-0001

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

46. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Belousov V. A. The parameters of filters based on a system of slots in the hollow inner conductor of a coaxial waveguide with parallel genetic algorithm optimization. 2013 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, 23-28 June, 2013. E-1.

Внесок здобувача: постановка задачі, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

47. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S.A. Operator method in the waves diffraction problem by a semiinfinite grating of strips placed in parallel planes. 2013 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, 23-28 June, 2013. E-4. DOI: 10.1109/MSMW.2013.6622094

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

48. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Wave diffraction by plane semi-infinite grating. The Seventh International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Kharkiv, Ukraine, 15-19 September, 2014. P. 96-99.

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

49. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Electromagnetic interaction of a single strip with a plane semi-infinite grating. 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Kharkiv, Ukraine, 21-24 April, 2015. P. 138-140. DOI: 10.1109/ICATT.2015.7136806

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

50. Калиберда М. Е., Погарский С. А., Шевченко Б. В., Позняков А. В. Модификация эффективной отражающей поверхности объекта за счет применения фрактальной решетки типа жалюзи с модифицированным краем. VIII Международная научная конференция "Функциональная база нанoeлектроники". Одесса, Украина, 28 сентября, 2015. с. 90-93.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

51. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Analysis of the H-polarized electromagnetic wave diffraction by an infinite periodical strip grating without one strip. 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016). Kharkiv, Ukraine, 20-24 June, 2016. H-4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538194

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

52. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Analysis of the E-polarized electromagnetic wave diffraction by an infinite periodical strip grating without one strip. 2016 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Lviv, Ukraine, 05-07 July, 2016. P. 248-251. DOI:10.1109/MMET.2016.7544072

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів

53. Koval'ova A. A., Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Analysis of the H-polarized electromagnetic wave diffraction by a semi-infinite periodical strip grating. 2016 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Lviv, Ukraine, 05-07 July, 2016. P. 252-255. DOI: 10.1109/MMET.2016.7544073

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

54. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Infinite periodic grating with one strip removed in the case of small strips width relative to the period. The 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Odessa, Ukraine, 05-11 September, 2016. P. 101-104. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2016.7724161

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

55. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Diffraction by two semi-infinite gratings placed in the same plane. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Kyiv, Ukraine, 29 May-2 June, 2017. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100345

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

56. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Diffraction by the semi-infinite knife-type grating of material strips. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017. Lviv, Ukraine, 17-20 October, 2017. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126627

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

57. Denisova A. R., Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Rebrik A. A. Diffraction by material strips placed in parallel planes. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017. Lviv, Ukraine, 17-20 October 2017. 2017. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126626

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

58. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Modeling of wave scattering by graphene strip gratings using integral equations combined with operator method. 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). Kiev, Ukraine, 2018. P. 30-33. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460262

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

59. Roiuk M., Kaliberda M., Pogarsky S., Lytvynenko L. Diffraction by finite graphene grating above perfectly electric conducting plane. The 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Odessa, Ukraine, 04-07 September, 2018. P. 94-97. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520112

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

60. Kaliberda M., Pogarsky S., Ilina T., Lytvynenko L. Operator method in diffraction by layered graphene grating. The 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). Odessa, Ukraine, 04-07 September, 2018. P. 98-101. DOI: 10.1109/UWBUSIS.2018.8520222

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

61. Kaliberda M., Pogarsky S., Roiuk M., Lytvynenko L. Diffraction by double layer graphene strip grating. IEEE 3th Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо'2018/UkrMiCo'2018). Odessa, Ukraine, 10-14 September, 2018.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

62. Kaliberda M., Lytvynenko L., Pogarsky S. THz wave scattering by graphene strip grating embedded into a dielectric slab with PEC plane. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018). Kyoto, Japan, November 6-9, 2018. P. 639-641. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617535

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

63. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Diffraction by double layer graphene strip grating. 2nd URSI AT-RASC. Gran Canaria, 28 May – 1 June 2018.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

64. Kaliberda M., Lytvynenko L., Ilina T., Pogarsky S. Excitation of guided waves and grating-mode resonances in the scattering by graphene strip grating inside dielectric slab. European Microwave Conference in Central Europe. Prague, Czech Republic, 13-15 May, 2019. P. 473-476.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

65. Pogarsky S., Smirnova K., Shcherbatiuk E., Kaliberda M. THz waves scattering by multilayer system of infinite graphene strip gratings. European Microwave Conference in Central Europe. Prague, Czech Republic, 13th-15th May, 2019. P. 477-480.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

66. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M. Scattering by infinite graphene strip grating with brake of periodicity. 2019 16th European Radar Conference. Paris, France. 2019. P. 19230988. Proceedings of the 49th European Microwave Conference. Paris, France, 1–3 October, 2019. P. 1028-1031. DOI: 10.23919/EuMC.2019.8910731

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

67. Kaliberda M., Pogarsky S., Lytvynenko L. Modeling of wave scattering by multilayer system of infinite graphene strip gratings using integral equations combined with operator method. IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, 16-18 April, 2019. P. 18934763. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783623

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

68. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Lytvynenko L. M., Ugrimova A., Ilna T. A., Shcherbatiuk E. Waves scattering by graphene semi-infinite grating. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2019). Lviv, July 2-6, 2019. P. 98-101. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879907

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

69. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Kaliberda L.M. Modeling of scattering of dielectric waveguide eigenwaves by system of graphene strips at THz. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, April 22-24, 2020. P. 230-233. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088799

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

70. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Kaliberda L.M. Radiation of planar dielectric waveguide eigenwaves scattered by graphene strip grating in THz range. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark, 15-20 March, 2020. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135852

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

71. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Lytvynenko L.M. Operator method in scalar wave scattering by circular slot in screen in case of dirichlet conditions. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, 21-25 September, 2020. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252632

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

72. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Lytvynenko L.M. Operator method in scattering by double-layer infinite strip grating without one strip in every layer. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, 21-25 September, 2020. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252628

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

73. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. THz wave scattering by double-layer infinite graphene strip grating without one strip in every layer. Proceedings of the 50th European Microwave Conference, Utrecht, Netherlands, 12-14 January, 2021. P. 20348903. DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338085

Внесок здобувача: вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

74. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. Scattering of natural waves of planar dielectric waveguide with PEC wall by graphene strip grating in THz range. Proceedings of the 50th European Microwave Conference. Utrecht, Netherlands, 12-14 January, 2021. P. 20348885. DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338089

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

75. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Kaliberda L.M. SLL reduction in planar dielectric waveguide with graphene strips using genetic algorithm. 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Düsseldorf, Germany, 22-26 March, 2021. DOI: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411043

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, проведення оптимізації параметрів, аналіз фізичних результатів.

76. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Kaliberda L.M. Operator method in approximate solution of dielectric waveguide eigenwaves scattering by graphene strips. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021). Lviv, Ukraine, 26-28 August, 2021. P. 84-87. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575513

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

77. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Lytvynenko L.M. Operator method in the E-polarized plane wave scattering by coplanar half-plane and disk: basic equations and convergence. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021). Lviv, Ukraine, 26-28 August, 2021. P. 88-91. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9576051

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

78. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Kaliberda L.M. Singular integral equations in THz waves scattering by finite number of graphene strips with dielectric substrate. 2022 IEEE 41th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, 10-14, October, 2022. P.243-246. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927016

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

79. Kaliberda M. E., Pogarsky S.A., Lytvynenko L.M. Plane wave scattering by two PEC zero-thickness disks placed above half-plane. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week. Kharkiv, 14-18 November, 2022. P. 22625890. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037159

Внесок здобувача: побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

80. Калиберда М. Е., Погарский С. А., Дроздов К. С. Розрахунок характеристик діелектричного електронегативного метаматеріала у круглому хвилеводі на основі багатопарового діелектрика. Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник. 2012. Вип. 170. С. 28-31.

Переклад англійською:

Kaliberda M. Ye., Pogarsky S. A., Drozdov, K. S. Calculation of dielectric electronegative metamaterial properties in a circular multilayered dielectric waveguide. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2013. Vol. 72, no. 16. P. 1481-1486. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.30 (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

81. Каліберда М. Є., Погарський С. О., Білоусов В. А. Метод гіперсингулярних інтегральних рівнянь у задачі дифракції на скінченому метаматеріалі на основі розімкнутих прямокутних рамок. *Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2013. вип. 172. С. 14-17.

Переклад англійською:

Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Belousov V. A. The method of hypersingular integral equations in a problem on diffraction by the finite metamaterial based upon open rectangular frames. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, no. 12. P. 1033-1040. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i12.10 (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

82. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Method of hypersingular integral equations in diffraction problem by strip grating of rectangular split-ring resonators. The VIII-th International Conference "Antenna Theory and Techniques" (ICATT), Odessa, Ukraine. 2013. Vol. 8. P. 420-422. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650798 (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

83. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Визначення електродинамічних характеристик коаксіального хвилеводу з системою щілин. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54309. 2014.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

84. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Electrodynamics characteristics calculation of metamaterial in circular waveguide periodically filled by dielectric discs. International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Dnipropetrovsk, Ukraine. 2014. P. 134-136.

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

85. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Визначення електродинамічних характеристик коаксіального хвилеводу з системою щілин у випадку аксіально-несиметричних хвиль. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 58013. 2015.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

86. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Паралельний розрахунок фільтру частот на основі коаксіального хвилеводу з системою щілин у порожньому внутрішньому провіднику. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 62120. 2015.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

87. Каліберда М. Є., Погарський С. О., Шевченко Б. В. Фрактальна решітка типу жалюзі з модифікованим краєм як основа для створення бажаної ефективної площі

розсіювання об'єкта. Радіотехніка. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник. 2016. Вип. 185. С.54-57.

Переклад англійською:

Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Shevchenko B. V. Venetian blind type fractal grating with modified edge as the basis for creation of the required efficient scattering area of the object. Telecommun. and Radio Engineering. 2016. Vol. 75, no. 16. P. 1435-1441 DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i16.20. (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

88. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Визначення електродинамічних характеристик двох прямокутних хвилеводів, зв'язаних системою щілин у спільній стінці. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 72455 від 23.06.2017. 2017.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

89. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Визначення електродинамічних характеристик одношарової графенової решітки// Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №81279 від 07.09.2018. 2018.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

90. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Визначення електродинамічних характеристик одношарової графенової решітки. Визначення електродинамічних характеристик нескінченної періодичної графенової решітки зі стрічок. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №89874 від 18.06.2019. 2019.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

91. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Скінченна графенова решітка з металевою площиною. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №91487 від 09.08.2019. 2019.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

92. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Електродинамічні характеристики нескінченної графенової решітки зі стрічок. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №98244 від 18.06.2020. 2020.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

93. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Електродинамічні характеристики скінченної графенової стрічкової решітки в діелектричній пластині. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №100695 від 23.09.2020. 2020.

Внесок здобувача: постановка задачі, написання комп'ютерної програми.

94. Каліберда М. Є., Погарський С. О. Дифракція Н-поляризованої хвилі на скінченній графеновій стрічковій решітці, розташованій на діелектричній підкладці. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022. Вип. 36. С.66-73. DOI: 10.26565/2311-0872-2022-36-05

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, побудова математичної моделі, аналіз фізичних результатів.

95. Kaliberda M. E., Lytvynenko L. M., Pogarsky S. A. GPU acceleration of Nystrom type method for solving singular integral equations in H-polarized EM waves scattering by strip

gratings. Frequenz. 2023. Vol.77, no.7-8. P. 329-336. DOI: 10.1515/freq-2022-0195 (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка задачі, вибір методу розв'язання, отримання сингулярного інтегрального рівняння, аналіз фізичних результатів.

96. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A., Sierhieieva A. A. Integral equations in the H-polarized wave scattering from metasurface formed by finite multilayer graphene strip grating inside grounded dielectric slab. Optical and Quantum Electronics. 2023. Vol.55. P. 1050. DOI: 10.1007/s11082-023-05288-5(SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка і розв'язання задачі, аналіз результатів.

97. Kaliberda M. E., Pogarsky S. A. Tunability of radiation pattern of the H-polarized natural waves of dielectric waveguide with infinite graphene plane and finite number of graphene strips at THz. Applied Sciences. 2023. Vol.13, no.19. P. 10563. DOI: 10.3390/app131910563 (SCOPUS)

Внесок здобувача: постановка і розв'язання задачі, аналіз фізичних результатів.

АНОТАЦІЯ

Каліберда М.Є. Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2024.

Дисертацію присвячено розвитку чисельно-аналітичних методів в теорії дифракції електромагнітних та акустичних хвиль на ідеально провідних та імпедансних плоских екранах, розташованих у вільному просторі, у плоских діелектричних хвилеводах, хвилеводах з ідеально провідними стінками. Граничні задачі для рівняння Гельмгольца зведено до інтегральних рівнянь. Властивості систем неоднорідностей знайдено з рівнянь, записаних у операторній формі, відносно амплітуд Фур'є розсіяного поля. На основі розвинених методів досліджуються структури, у яких поля подаються як плоскі, циліндричні та сферичні хвилі, а також як їх суперпозиція. Досліджено напівнескінченні періодичні стрічкові решітки, нескінченні періодичні та скінченні решітки у вакуумі та у плоскому діелектричному хвилеводі, багат шарові решітки, нескінченні одношарові та двошарові стрічкові решітки без скінченної кількості стрічок. Розглянуто електромагнітну взаємодію двох напівнескінченних решіток з довільним зазором між ними. У якості імпедансних стрічок при отриманні числових результатів обрано графенові стрічки. Досліджено розсіяні поля нескінченно тонкого кільця, електромагнітну взаємодію одного або двох дисків та напівплощини. Досліджено властивості круглого хвилеводу зі скінченною та напівнескінченною періодичною системою аксіально-симетричних неоднорідностей. Проведено оптимізацію параметрів.

Ключові слова: дифракція, метод сингулярних інтегральних рівнянь, операторний метод, метод моментів, генетичний алгоритм, стрічкова решітка, ідеально провідні стрічки, імпедансні стрічки, графен, диск, діелектричний хвилевід, круглий хвилевід.

ABSTRACT

Kaliberda M.E. Numerical-analytical methods in the theory of waves diffraction by plane screens. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.04.03 – Radio Physics. V. N. Karazin Kharkiv National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development of the numerical-analytical methods in the diffraction theory of the electromagnetic and acoustic waves by perfectly electric conducting and impedance plane screens in free space, dielectric waveguides, waveguides with perfectly electric conducting walls. The dissertation proposes an approach in which a complex multi-element obstacle is represented as a combination of more simple ones, which can be single strip, disk, whole in the plane, etc. The solution of the so-called key problem, the diffraction problem by a single discontinuity is known or it is obtained by the methods developed in the dissertation. The properties of the whole structure are determined with the help of the operator method. The boundary-value problems for the Helmholtz equation are reduced to the integral equations. The properties of the systems of discontinuities are obtained from equations relatively Fourier amplitudes of the scattered field written in the operator form. On the basis of the developed methods, the structures where fields are represented as plane, cylindrical, spherical waves, as well as the superposition of these waves are studied. The semi-infinite periodic gratings, infinite periodic as finite gratings in vacuum and inside the plane dielectric waveguide, multilayer gratings, single-layer and double-layer strip gratings without finite number of strips are studied. The physico-mathematical models of the semi-infinite systems of discontinuities of various types are developed using the operator method in combination with the method of singular integral equations and the method of moments. On the basis of these models, highly efficient numerical algorithms are created for the calculation of the scattered fields and electrodynamic parameters of the discontinuities. A general theory of the scattering of electromagnetic waves by the infinite periodic gratings with a break of periodicity is created. Rigorous solutions to diffraction problems are obtained and the characteristics of the fields that excites as a result of the brake of periodicity are analyzed in detail. The mutual influence of the perfectly electric conducting and graphene strips in periodic gratings and the guiding properties of the structures are determined. For the first time, it is shown that in the case of the graphene infinite grating, the interaction of strips is noticeably stronger both near the Rayleigh-Wood anomaly and near the plasmon resonances. For the first time, the results about electrodynamic characteristics of graphene gratings, including the semi-infinite graphene strip grating in vacuum and placed inside a dielectric waveguide, a semi-infinite system of layers of infinite graphene gratings in a dielectric slab, are obtained. The effects of excitation of a number of resonances, which the considered structures are able to support, and their influence on the characteristics of the fields are determined. A generalized methodology for studying the interaction of zero thickness impedance scatterers with the plane electromagnetic waves is developed. The optimization of parameters is made.

Keywords: diffraction, method of singular integral equations, operator method, method of moments, genetic algorithm, strip grating, perfectly electric conducting strips, impedance strips, graphene, disk, dielectric waveguide, circular waveguide.