

ВІДГУК

офіційного опонента Ячина Володимира Васильовича на дисертаційну роботу Каліберди Мстислава Євгеновича «Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах», подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Актуальність теми

Вивчення явища дифракції електромагнітних хвиль на плоских екранах є ключовим для розуміння та прогнозування властивостей широкого класу пристроїв, таких як антени, фільтри, сенсори, частотно-селективні поверхні, а також інших елементів радіотехнічних систем. Аналіз хвильових процесів у таких структурах дозволяє також забезпечити розвиток нових підходів до проектування пристроїв із поліпшеними характеристиками.

Окремо слід зазначити отримання результатів стосовно застосування новітніх матеріалів, таких як графен. Унікальні електродинамічні властивості графену, що можуть бути описані через імпедансні граничні умови, відкривають перспективи створення нових класів пристроїв. Зокрема, можливість динамічного керування параметрами графенових стрічок дозволяє розробляти перестроювані фільтри, сенсори та антени, що є актуальним у контексті мікро- та нанотехніки. У цьому аспекті побудова чисельно-аналітичних моделей для опису взаємодії хвиль із графеновими екранами сприяє як поглибленню фундаментальних знань, так і створенню інноваційних технологій.

Питання аналізу решіток, які мають збої періодичності, також є важливим напрямом досліджень. Такі структури демонструють набір унікальних властивостей, які недоступні для ідеально періодичних систем. Моделі розсіяння хвиль на структурах зі збоєм періодичності можуть бути використані при створенні фотонних кристалів, виявленні дефектів у решітках або оптимізації частотно-селективних поверхонь. Для коректного математичного опису таких систем необхідна розробка підходів, які враховують відсутність строгої періодичності і забезпечують високу точність розв'язку задач.

Розробка чисельно-аналітичних методів, які поєднують сильні сторони числових і аналітичних підходів, виконувана в рамках роботи, є особливо **актуальною** для вирішення складних задач моделювання та оптимізації електродинамічних систем нового покоління. Актуальність розвитку чисельно-аналітичних методів обумовлена багатьма причинами, і, перш за все, – зростаючою складністю багатьох електродинамічних структур, які зустрічаються в практичних застосуваннях. Аналітичні методи можуть давати фундаментальну інформацію, описуючи лише базові фізичні явища в спрощених сценаріях. Вони часто стикаються з обмеженнями при роботі зі складними некласичними геометриями. З іншого боку, числові методи можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів, їх розв'язкам бракує аналітичного опису фізичних процесів. Поєднуючи аналітичний і числові

підходи, чисельно-аналітичні методи спрямовані на використання сильних сторін обох методологій, одночасно пом'якшуючи їхні індивідуальні обмеження. Такі методи дозволяють досягти високої точності розрахунків навіть для складних геометрій, забезпечуючи математично обґрунтовану збіжність і стабільність алгоритмів. Це відкриває можливості для детального аналізу складних структур і оптимізації їх параметрів. Особливе значення мають безсіткові методи, які враховують умови випромінювання та граничні умови на ребрах екранів. Розвиток чисельно-аналітичних методів для дослідження дифракції хвиль на плоских екранах забезпечує не лише поглиблення теоретичних знань, але й сприяє створенню нових технологій і пристроїв, що відповідають сучасним викликам у галузі радіофізики.

За цими причинами, тема дисертаційного дослідження є безумовно **актуальною** як з точки зору фундаментальних досліджень, так і з огляду на прикладні аспекти. Про актуальність та практичну значущість дисертації також свідчить те, що матеріали дисертації є складовими частинами 13 науково-дослідних робіт. Автор був науковим керівником 2 робіт.

Наукова новизна результатів

Дисертаційну роботу пов'язано з виявленням закономірностей взаємодії хвиль з нескінченними періодичними, напівнескінченними та скінченними структурами, зі структурами, які мають збій у періодичності розташування елементів. Вона робить значний внесок у розуміння взаємодії різних типів хвиль (плоских, сферичних, циліндричних електромагнітних та акустичних) з багатоелементними періодичними електродинамічними структурами, які містять в своєму складі плоскі ідеально-провідні або імпедансні розсіювачі. Розроблено фізико-математичні моделі та числові алгоритми для аналізу розсіяних полів та електродинамічних параметрів багатоелементних структур, які включають різні типи неоднорідностей та матеріалів.

На базі строгих чисельно-аналітичних методів розроблено єдину методологію для дослідження електродинамічних властивостей систем, розсіяні поля в яких мають як дискретний, так і неперервний спектр. Вперше побудовано схему розв'язання нелінійного операторного рівняння для напівнескінченних структур у випадку багатомодового режиму, а також у випадку неперервного просторового спектру розсіяного поля. Розроблено процедуру дискретизації нелінійних інтегральних рівнянь з сингулярними ядрами, до яких зведено операторні рівняння задач про дифракцію на напівнескінченних періодичних решітках.

Отримано конкретні фізичні результати та побудовано строгі математичні моделі нескінченних решіток зі збоєм періодичності у розташуванні елементів. Вперше отримано строгі розв'язки для решіток зі збоєм періодичності у випадку імпедансних граничних умов. Показано, що у випадках, коли поле дифрагуючої плоскої хвилі дорівнює нулю або має малу амплітуду, стає помітним вплив складової поля, яке з'являється через порушення періодичності у нескінченній решітці. У випадку двошарової решітки без скінченного числа стрічок у кожному шарі запропоновано спосіб

керування шириною головного пелюстка за рахунок зміни частоти чи періоду. Встановлено, що за умов, коли коефіцієнт проходження плоскої хвилі наближається до нуля, поле, яке пройшло, визначається циліндричною хвилею, а діаграма спрямованості має широкий головний пелюсток із шириною приблизно 80° за рівнем 0.707 амплітуди. У смузї ж запирання діаграма спрямованості характеризується надвузьким головним пелюстком. У випадку графенової решітки шириною головного пелюстка можна керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу. Кількісно визначено взаємозв'язок графенових стрічок у решітках.

Розроблено строгі чисельно-аналітичні методи для дослідження розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль скінчевими та нескінченними імпедансними стрічковими решітками у вакуумі та у шарі діелектрика. Ключовим є зведення граничної задачі для рівняння Гельмгольца до сингулярних інтегральних рівнянь з додатковими умовами. Дискретизацію сингулярних інтегральних рівнянь з додатковими умовами проведено з використанням одного з алгоритмів типу Найстрема. У роботі запропоновано підходи до керування електродинамічними властивостями структур, зокрема методи динамічного керування графеновими решітками.

Виявлено збудження низки резонансів у графенових решітках та досліджено пов'язані з цим ефекти. Вперше показано, що зміна хімічного потенціалу графену дозволяє ефективно керувати збудженням власних хвиль діелектричних хвилеводів, а також характеристиками розсіяння та поглинання. Вперше встановлено, що одночасне збудження плазмонних резонансів і резонансів на решіткових модах створює додаткові можливості для динамічного регулювання потужності, яка переноситься власними хвилями діелектричного хвилеводу. Це створює передумови для реалізації адаптивних і програмованих збуджувачів власних хвиль та випромінювачів на основі графенових матеріалів. Новим є розвинення паралельного генетичного алгоритму і використання його для оптимізації параметрів випромінювача на базі стрічкових графенових решіток.

Вперше показано, що за рахунок взаємодії резонансів на поверхневих плазмон-поляритонних хвилях і резонансів на модах багат шарової структури, при визначених значеннях параметрів відбувається розширення зони поглинання.

Вперше на основі строгого підходу розглянуто дифракцію хвиль на системі, яка складається з напівплощини та дисків. Особливостями розв'язання задач є подання складної перешкоди як об'єднання більш простих, класичних об'єктів, розв'язок задач про дифракцію на яких є відомим. Доведено, що операторні рівняння можна звести до інтегральних рівнянь, які успішно розв'язано чисельно з використанням побудованої схеми регуляризації та дискретизації.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів, наукових положень, висновків забезпечено коректним використанням фундаментальних підходів і методів математичної фізики, методів числового аналізу та оптимізації. Впевненість у вірності отриманих результатів

забезпечуються комплексним підходом до перевірки розв'язків, який включає:

- числову перевірку виконання закону збереження енергії та граничних умов;
- порівняння отриманих результатів із даними, представленими в літературі іншими авторами;
- порівнянням з результатами, отриманими за допомогою комерційного програмного забезпечення;
- використання різних методів для розв'язання одних і тих самих задач у рамках дисертаційної роботи, що дозволяє оцінити узгодженість і коректність результатів.

Наукова і практична значимість

У роботі впроваджено цілісний і комплексний підхід до вирішення важливої науково-практичної проблеми – створення нових штучних матеріалів, елементів та вузлів НВЧ і ТГц діапазонів з унікальними електродинамічними характеристиками. Основу таких структур складають набори плоских екранів у вигляді стрічок, дисків, кільцевих щілин, розташованих у вільному просторі, у шарах діелектрика, у хвилеводах та ін.

Отримані автором результати, запропоновані фізично коректні математичні моделі, методи та алгоритми розрахунку характеристик розсіяння, поглинання та збудження електромагнітних хвиль на системах плоских екранів, в тому числі і багат шарових, з ідеально провідними та імпедансними граничними умовами є цікавими як з теоретичної точки зору, так і можуть знайти своє безпосереднє застосування при розв'язанні низки прикладних задач.

1. Результати аналізу дифракції хвиль на напівнескінчених решітках, на решітках з відсутніми стрічками мають пряме відношення до напрямку, пов'язаного з визначенням дефектів у періодичних масивах по розсіяних полях.

2. Результати дисертації стосовно відбиття від краю, зокрема, його зменшення, у сукупності з результатами стосовно поглинання електромагнітного поля графеновими стрічковими решітками є важливими у сфері створення поглинаючих та маскуючих систем подвійного призначення.

3. Зібрана під час виконання досліджень інформація о суттєвості впливу хімічного потенціалу графену, який можна змінювати динамічним чином за рахунок прикладення електростатичного поля, на характеристики розсіяних полів дозволяє використовувати виникаючі при цьому ефекти у якості ключових при реалізації функції динамічного керування.

4. Результати дисертації дозволяють прогнозувати створення антенних систем з керованою шириною діаграми спрямованості та потужністю випромінювання.

5. Отримані результати стосовно резонансів на решіткових модах можуть бути використані при усуненні недоліків у фазованих антенних

решітках, пов'язаних з появою сліпих зон, а також при усуненні недоліків у поглиначах, пов'язаних з появою надвузьких зон прозорості.

Розроблені алгоритми та моделі дозволяють створювати ефективні автоматизовані системи проєктування частотно-селективних поверхонь, антенних систем, фільтрів, поглиначів та інших пристроїв. Запропоновані та розвинені у роботі методи відрізняються своєю ефективністю порівняно з комерційними пакетами. Вони дозволяють контролювати точність розрахунків на всіх етапах моделювання.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам

Дисертація являє собою цілісне закінчене наукове дослідження, виконане самостійно автором, в результаті якого розроблено методологію та розвинено строгі чисельно-аналітичні методи для аналізу дифракції хвиль на системах плоских неоднорідностей, поставлено та розв'язано задачі моделювання та синтезу перестроюваних систем НВЧ та ТГц діапазону, до складу яких входять елементи з нових матеріалів, запропоновано способи ефективного керування їх електродинамічними характеристиками.

Результати кандидатської дисертації Каліберди М.Є. "Метод спектральних операторів розсіяння у задачах дифракції хвиль на багатоелементних послідовностях неоднорідностей" у його докторській дисертації не використовувалися.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Автореферат досить повно відображає основні положення дисертації.

Результати, викладені у дисертації, в повній мірі відображено у 4 монографіях (1 з них англomовна), 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), а також у 34 публікаціях в матеріалах міжнародних конференцій. Окрім цього додатково результати відображено у 9 публікаціях і 9 свідоцтвах про авторське право на твір. Матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію на 26 конференціях і семінарах.

Академічний плагіат, фабрикації, фальсифікації у тексті дисертації відсутні.

Зауваження та недоліки. Незважаючи на високий науковий рівень виконання дисертації, варто зазначити деякі її недоліки.

1. У розділі 1 для порівняння результатів для нескінченної періодичної і напівнескінченної структур вводиться відповідний нормований коефіцієнт відбиття. Варто було б пояснити, чому саме обрано таку величину, а не, наприклад, стандартний коефіцієнт відбиття, який визначає амплітуду відбитої плоскої хвилі.

2. У розділах 5, 6 передбачається, що у діелектричному середовищі, у яке занурено графенові стрічкові решітки, втрати відсутні. Виникає питання, наскільки таке припущення є обґрунтованим. Добре відомо, що при переході від НВЧ діапазону до інфрачервоного вплив втрат у матеріалах суттєво збільшується. Це ж стосується і структури, яка містить діелектричний

хвилевод з ідеально провідною площиною. Наскільки припущення ідеальної провідності матеріалу стінки хвилеводу є виправданим. Варто було б у роботі також дослідити властивості структури у випадку середовища з втратами.

3. Обсяг дисертації є дещо завеликим. Результати роботи опубліковано у достатній кількості наукових праць, тому графічний матеріал можна було б скоротити. Також можна було б об'єднати розділи 5, 6 у один розділ, оскільки вони присвячені дослідженню імпедансних і, зокрема, графенових стрічкових решіток з еквідистантним розташуванням елементів.

4. В роботі присутні також деякі описки та стилістичні недоліки. У реченні на с. 255 “У смузї ж запирання поле, яке пройшло, має над вузький головний пелюсток (дельта-функція)” замість “запирання” повинно бути “пропускання”. Замість “постійна поширення” краще використовувати “стала поширення”.

Втім, наведені зауваження жодним чином не применшують наукової цінності, актуальності та загального позитивного враження від виконаної роботи.

Висновки по роботі в цілому. На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота “Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах” за своєю актуальністю, науковою новизною, практичною значимістю результатів відповідає всім вимогам, зазначеним у “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 р. № 1197 (зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор, Каліберда Мстислав Євгенович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:
завідувач науково-дослідного
відділу теоретичної радіофізики
Радіоастрономічного інституту
Національної академії наук України,
доктор фізико-математичних наук,
старший дослідник

Володимир ЯЧИН

Підпис д. ф.-м. н., ст.досл. Ячина В. В. засвідчую:
Вчений секретар Радіоастрономічного інституту
НАН України
кандидат фізико-математичних наук



Юлія АНТОНЕНКО

“14” січня 2024 р.