

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Синявського Андрія Тадейовича на тему «**Математичні моделі для підвищення ефективності оцінки параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного електромагнітного поля**»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми.

Розв'язання обернених задач розсіювання охоплює багато наукових напрямів, де використовуються математичні методи, включаючи дистанційне зондування, медичну і промислову томографію, дефектоскопію тощо. Радіолокаційні системи побудови зображень, метеонавігаційні радіолокаційні системи та радіолокаційні системи підповерхневого зондування відіграють ключову роль в забезпеченні безпеки руху наземного, морського та повітряного транспорту, прогнозуванні небезпечних метеорологічних явищ, картографуванні та розвідці корисних копалин. Не менше значення в передбаченні ресурсу функціонування механізмів, конструкцій та об'єктів в різних галузях промисловості відіграють засоби неруйнівного контролю, в яких принци функціонування та фізичні ефекти, що використовуються для ідентифікації ушкоджень та дефектів, схожі до принципів радіолокаційного зондування. Спільним для вище перелічених засобів є й те, що об'єктам дослідження та контролю відповідають моделі неоднорідного середовища. Розробка таких пристроїв та систем з метою розширення функціональних можливостей, підвищення точності показників та покращення загальної ефективності є задачею, що має надзвичайне значення, а їх прогресивний розвиток може істотно вплинути на різні області життєдіяльності людини.

Варто відмітити, що завдяки останнім відкриттям у фізиці, електроніці та нанотехнологіях сучасна елементна база високочастотних елементів радіотехнічних систем та пристроїв дозволяє будувати засоби вимірювання та дистанційного зондування, які за чутливістю, шумовими характеристиками, динамічним діапазоном та шириною діапазону робочих частот істотно перевищують показники давніших аналогів. Це вказує на можливість точніше вимірювати складові електромагнітного поля, збираючи інформацію про його розподіл.

З іншої сторони, процес обробки зібраної інформації, який є невід'ємною складовою зазначених пристроїв та систем, в більшості випадків базується на моделі точкового розсіювання та моделях, які не враховують явища багатократного відбиття хвиль. Невідповідність моделі процесів розсіювання та моделі, на якій побудований принцип обробки сигналів в радіолокаційних системах, вимірювальних засобах та засобах неруйнівного контролю може істотно спотворити результат та привести до пропуску шуканих розсіюючих неоднорідностей, реєстрації фіктивних явищ,

а також втрати точності вимірювання контрольованих параметрів.

Перелічені аргументи вказують на необхідність розробки нових математичних моделей для аналізу процесів розсіювання електромагнітних хвиль та побудови нових принципів ефективної обробки, які враховують увесь спектр явищ, характерних для розсіювання на складних об'єктах в неоднорідних середовищах. Такого типу задачі можуть бути розв'язані двома способами: 1) спрощенням точної моделі електромагнітних процесів, якою є рівняння Максвелла, з метою встановлення явних залежностей між величинами, що спостерігаються, та величинами, що необхідно оцінювати; 2) побудовою складних математичних методів оцінювання, які базуються на точній моделі процесів розсіювання хвиль. Враховуючи те, що в першому способі похибка зазвичай стає неприпустимо великою, перспективним видається другий спосіб, незважаючи на те, що він вимагає значних зусиль для детального аналізу фізичних процесів поширення електромагнітних хвиль в неоднорідних середовищах та застосування складного математичного апарату для розв'язання оберненої задачі розсіювання. На відміну від прямих задач розсіювання, оберненим задачам приділялося значно менше уваги, через складність отримання їх загального розв'язку та їх варіабельність, в залежності від особливостей практичного використання розв'язків таких задач.

Тим не менше, побудова методів оцінки параметрів неоднорідних середовищ на основі розв'язків обернених задач розсіювання за дистанційно вимірними значеннями розсіяного поля, відкриває перспективи щодо створення нових процедур обробки інформації в радіолокаційних системах, засобах неруйнівного контролю та системах дистанційного зондування. Як наслідок, це має дати можливість здійснювати точну мікрохвильову візуалізацію об'єктів, ідентифікувати неоднорідності, локалізувати точкові розсіювачі в неоднорідному середовищі, вчасно виявляти дефекти внутрішньої структури, що в свою чергу гарантуватиме кращу точність, роздільну здатність та інформативність сучасних радіотехнічних систем, збільшить надійність контролю та дозволить уникнути багатьох загрозливих ситуацій.

Таким чином, науково-технічна проблема розвинення теорії математичного моделювання процесів розсіювання хвиль в складних середовищах для підвищення ефективності методів оцінювання параметрів таких середовищ за вихідними даними про розподіл електромагнітного поля є надзвичайно **актуальною**.

Основна ідея дисертації А. Т. Синявського полягає в тому, щоб електродинамічним моделям розсіювання поставити у відповідність моделі квантового розсіювання та використати аналітичні властивості параметрів в таких моделях. Проміжною метою є приведення обернених задач розсіювання до задачі Гільберта-Рімана та запису їх розв'язків у вигляді послідовності тривіальних математичних задач (інтегральних і диференціальних рівнянь), існування розв'язків яких вдається довести. Варто наголосити, що для встановлення границь розсіювачів та поверхонь

розділу, математичну модель розсіяного поля подано статистично, як набір реалізацій деякого випадкового процесу, що має інтегральне представлення. Завдяки введенню такої моделі автору вдалося єдиним чином підійти до вирішення задачі побудови індикаторних функцій, значення яких при наближенні до границі розсіювача прямує до максимуму.

Актуальність проблеми, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконувалася згідно з напрямом «Неруйнівний контроль і діагностика властивостей матеріалів, середовищ і конструкцій» у відповідності до постанови Президії НАН України № 277 від 7 листопада 2007 року у рамках держбюджетних наукових тем за відомчим замовленням НАН України у відділі фізичних основ діагностики матеріалів (з 2009 по 2015 рік) та відділі методів та систем обробки, аналізу та ідентифікації зображень матеріалів (з 2002 по 2008 рік) Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. Крім того у дисертаційну роботу ввійшли результати досліджень, отримані автором у рамках цільової науково-дослідної програми Міністерства промислової політики України і ДК Укрспецекспорт (ДКР «Астра» згідно з Договором комісії РОЕ-30/046-2001).

Автор був відповідальним виконавцем низки науково-дослідних тем, результати яких знайшли впровадження у виробництві та науково-дослідних установах в Україні, що підтверджено актами про впровадження. Дослідження за тематикою дисертації автор неодноразово провадив в навчально-наукових закладах закордоном, у Польщі та США, що ще раз підтверджує актуальність та важливість наряду дисертаційних досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Основним інструментом обґрунтування наукових положень та висновків, викладених в дисертації, є методи критичного аналізу, математично строгі доведення та числова верифікація. Автор бере до уваги те, що розробка методів розв'язання обернених задач розсіювання спрямована на практичне їх використання в реальних надвисокочастотних вимірювальних пристроях та радіолокаційних системах для обробки сигналів. Саме тому, при обґрунтуванні основних тверджень, отриманих теоретично, автор дисертації надає великого пріоритету врахуванню умов практичного застосування.

Варто виділити дві парадигми, на яких побудована дисертація:

1) необхідність введення нових математичних моделей, оскільки існуючі моделі, що покладені в основу теорії обернених задач розсіювання, та методи обробки результатів вимірювань з метою оцінки невідомих параметрів середовища, мають частковий характер і не враховують різноманіття матеріалів та структури реальних об'єктів: наявність в них границь розділу та неперервних частин, наявність втрат електромагнітного поля, дисперсійні властивості, тощо;

2) необхідність розробки математичних методів розв'язання обернених задач розсіювання, для яких вихідні дані задано частково через існуючі

обмеження на ширину смуги частот, доступність спостережень лише в обмеженому діапазоні кутів спостереження, складністю реалізації когерентних методів детектування сигналів тощо.

Саме через це автор дисертацій математично строго вводить нові моделі та формулює обернену задачу розсіювання при відповідних вихідних даних. Наведемо чотири приклади.

1. Намагаючись усунути недоліки існуючих методів, автор приходиться до думки, що комплексна функція коефіцієнту відбиття, як вихідні дані, не є достатньо зручною для розв'язання одновимірної оберненої задачі щодо середовищ, які мають контрастні поверхні розділу. Це пояснюється тим, що за умови практичного експерименту неможливо знайти всі коефіцієнти розкладу цієї функції в збіжний ряд, а втрата точності коефіцієнтів істотно спотворить результат оцінювання параметрів шарів структури. Саме тому автор пропонує здійснювати реконструкцію всіх елементів матриці розсіювання, і відповідно знаходити коефіцієнти в так званих, розв'язках Йоста. Такий прийом дає багатозначний позитивний ефект, оскільки дозволяє створити новий метод оцінювання параметрів шаруватих структур з однорідними шарами та коректно параметризувати високочастотну складову коефіцієнтів матриці розсіювання для структур з кусково-неперервним профілем матеріальних параметрів. Окрім того, завдяки моделі розв'язків Йоста вдається отримати нові розв'язки задачі про оцінку параметрів шаруватих структур на провідній основі, задачі про встановлення сферично-шаруватої структури за її трансмісійними власними значеннями, та для задачі оцінки параметрів структури за модулем коефіцієнта відбиття або коефіцієнта проходження. Всі результати є логічними та математично доведеними, на основі положень теорії аналізу функцій дійсної та комплексної змінної.

2. Для збільшення ефективності методів оцінювання параметрів середовищ, в яких матеріальні параметри змінюються неперервно, автор дисертації заміщає модель процесів розсіювання – новою, квантово-механічною, яка базується на системі Дірака. Основним аргументом на користь такої моделі є те, що асимптоти розв'язків електродинамічної задачі та розв'язків задачі для системи Дірака співпадають, якщо функція матеріальних параметрів зв'язана з функцією потенціалу системи Дірака визначеним чином. Властивості аналітичності функцій, які можна побудувати для розв'язків рівняння Дірака, дозволяють привести обернену задачу до задачі Гільберта-Рімана. Обґрунтуванням такого підходу служить і той факт, що вдалося його узагальнити на різні обернені задачі розсіювання, без використання припущень.

3. Аргументом на користь використання наближених оцінок для знаходження координат розташування границь розділу середовищ є наявність випадкових похибок у вхідних даних, що притаманні експериментальним вимірюванням, та просторові і спектральні обмеження. Випадковий характер параметрів у запропонованих моделях зумовлює використання ймовірнісних підходів до отримання оцінок, а отже,

розвинутий автором дисертації підхід є цілком обґрунтованим.

4. В тих випадках, де пошук розв'язку оберненої задачі розсіювання методом приведення до тривіальних математичних задач є надзвичайно складним, автор дисертації використовує узагальнений підхід, який полягає у мінімізації нев'язки між вихідними даними та синтезованими. Це стосується задачі встановлення форми об'єкту та оцінки розподілу переміщень його поверхні за стереозображеннями. Через некоректність поставленої задачі використано регуляризацію у формі моделі анізотропної дифузії, що обґрунтовано наявністю явищ затінення елементів поверхні при реєстрації оптичних зображень.

Отже, отримані автором наукові результати є логічними, математично доведеними, за сформульованих умов можуть бути однозначно інтерпретовані, не суперечать базовим твердженням математики і фізики електромагнетизму та не створюють протиріч при оцінці можливостей імплементації цих результатів на практиці.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність основних наукових положень і одержаних результатів забезпечується використанням фізично обґрунтованих математичних моделей процесів розсіювання електромагнітних хвиль, теоремами про існування та єдиності розв'язків інтегральних рівнянь та збіжність рекурентних процедур, до яких приведені розв'язання оберненої задачі розсіювання. Окрім того, властивість збіжності до істинного розв'язку підтверджена в окремих випадках аналітично.

Загальною схемою оцінки достовірності методів розв'язку обернених задач є встановлення похибки на основі порівняння числових результатів з точно відомими. Про достовірність запропонованих методів можна судити з того, що відмінність аналітичних результатів та результатів, що отримано числовими методами, знаходиться в межах похибки числового алгоритму, який використано для розв'язання задачі. Достовірність також підтверджується збіжністю окремих отриманих результатів з даними інших авторів.

Підсумовуючи, можна засвідчити, що основні наукові результати в дисертації в цілому є теоретично добре обґрунтованими, а їх достовірність підтверджено широким обсягом числових та експериментальних результатів, які отримано при перевірці розв'язків обернених задач розсіювання для тестових випадків.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше

1) Розроблено загальну модель процесу взаємодії хвилі з неоднорідним середовищем, яка завдяки приведенню форми рівнянь електромагнітного поля до рівняння Дірака та аналізу високочастотних асимптот його розв'язку, дозволяє виділити вплив на розсіяне поле неперервної частини функцій матеріальних параметрів та внесок в розсіювання контрастних границь розділу, і, на відміну від відомих моделей, дає можливість звести задачу визначення функції матеріальних параметрів за просторово-

частотною структурою розсіяного поля до розв'язку інтегрального рівняння, а ідентифікацію границь розділу середовищ – до оцінки параметрів суми комплексних тригонометричних функцій.

2) Розроблено метод оцінювання параметрів плоско-неоднорідних середовищ, в основі якого лежить система інтегральних рівнянь та числовий спосіб їх рекурентного розв'язання, що дозволяє реконструювати функцію діелектричної проникності та функцію провідності середовища за частотною залежністю елементів матриці розсіювання. Такий метод дає можливість наближено реконструювати контрастні поверхні розділу плоского середовища через апроксимацію дельта функцій в ядрі інтегрального рівняння, параметрами яких встановлюються згідно з високочастотною поведінкою коефіцієнта відбиття. Для точного оцінювання параметрів поверхонь розділу шаруватих структур з однорідними шарами окремо розроблено рекурентну схему, що базується на відновленні елементів матриці розсіювання за коефіцієнтом відбиття.

3) Розроблено загальний підхід до розв'язання оберненої задачі розсіювання для шаруватого діелектрика на ідеально-провідній основі та оберненої спектральної задачі для сферичного шаруватого діелектрика, який полягає у приведенні вихідних даних цих задач до вихідних даних для задачі шаруватого діелектрика, розв'язок якої можна знайти за скінчену кількість кроків застосуванням розробленої рекурентної процедури.

4) Створено метод розв'язання оберненої задачі розсіювання відносно невідомої функції діелектричної проникності плоско-неоднорідної структури для випадку, коли вихідні дані задано на фіксованій частоті у вигляді комплексного коефіцієнта відбиття, як залежності від кута падіння. Метод базується на заміні електродинамічної моделі взаємодії плоскої хвилі з середовищем, квантомеханічною моделлю, оскільки для кожної з двох поляризацій встановлено взаємозв'язок між функцією діелектричної проникності та функцією потенціалу, яку можна обчислити з розв'язку інтегрального рівняння, в тому числі й аналітично, якщо коефіцієнт відбиття є раціональною функцією.

5) Запропоновано узагальнений метод оцінювання координат точок границі розділу середовищ, що полягає у знаходженні індикаторних функцій у вигляді функціонального перетворення, що впливає з розв'язку задачі мінімізації з обмеженнями, вихідні дані для якої задано у вигляді функції розподілу розсіяного поля. Ефективність запропонованого методу пояснюється оригінальним принципом знаходження оцінки, яка полягає в уточненні результату, що отримано наближеним методом.

6) Розроблено метод обробки сигналів для чотириканальної антенної системи з метою усунення негативного впливу когерентної завади на прийом сигналу від джерела випромінювання, що знаходиться над розсіюючою поверхнею та забезпечує двопробеневий сценарій поширення хвилі в напрямку до антени. В основі розробленого методу обробки покладено розв'язок системи рівнянь, записаних для миттєвих значень сигналів відносно невідомих параметрів комплексної обвідної сигналу.

Вдосконалено:

7) Підхід до розв'язання оберненої задачі розсіювання для вихідних даних, які задано частково, а саме такими, що виражені модулем комплексної функції коефіцієнта. Такий підхід передбачає вирішення задачі реконструкції фази, яка, в загальному випадку, має багато розв'язків. На відміну від інших методів, розвинутий підхід, за рахунок аналізу розподілу нулів функцій в комплексній площині, дає можливість однозначного розв'язання оберненої задачі для оцінки параметрів багатошарових структур з виділенням випадків, коли кількість розв'язків є скінченим числом.

8) Підхід до оцінювання поля переміщень поверхні об'єкту в просторі трьох координат за плоскими зображеннями, що зафіксовані оптичною системою двох фіксованих камер в різні моменти часу. Цей підхід зводиться до тривимірної реконструкції поверхні об'єкту та встановлення відповідності між елементами поверхні в різні моменти часу та для різних проєкцій через розв'язання відповідної варіаційної задачі, що у порівнянні з відомими підходами не потребує забезпечення когерентності оптичної системи.

Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Отримані результати є важливими для науки і практики тому, що розвинені теоретичні основи математичного моделювання процесів розсіювання електромагнітних хвиль в неоднорідних середовищах та теорії обернених задач покладено в основу створення ефективних обчислювальних методів для оцінювання параметрів середовищ та розсіювачів за розподілом поля, що на практиці застосовується для обробки результатів вимірювань, обробки сигналів в радіолокаційних системах та пристроях неруйнівного контролю, а також при синтезі багатошарових елементів оптики та надвисокочастотної техніки.

Практичне значення роботи. На основі отриманих теоретичних результатів та розроблених числових методів створено процедури та запропоновано алгоритми для розв'язання низки прикладних задач, зокрема:

1) метод оцінювання діелектричної проникності плоско шаруватих середовищ за коефіцієнтом відбиття, метод реконструкції кусково-неперервних функцій матеріальних параметрів, а також метод відновлення функцій діелектричної проникності та провідності, використано для числового моделювання експериментальних вимірювань та опрацювання можливості здійснення візуалізації структури шаруватих матеріалів та неруйнівного контролю;

2) підхід до встановлення параметрів багатошарових структур за модулем частотних залежностей коефіцієнта відбиття та/або коефіцієнта проходження використано для синтезу фільтрів, які можуть бути реалізовані як плоскі багатошарові структури та інші схеми з неоднорідно-розподіленими параметрами, зокрема фільтри на неоднорідних смужкових лініях передачі;

3) результати аналізу оберненої задачі розсіювання для вихідних

даних, що задано абсолютним значенням коефіцієнта відбиття, використано для проектування експериментального вимірювального пристрою, який сконструйовано за мостовою схемою з квадратичним детектором та для розробки методу обробки сигналів в такій вимірювальній системі з метою ідентифікації підповерхневих дефектів в композитних матеріалах;

4) метод розв'язку оберненої задачі для заданої кутової залежності коефіцієнта відбиття застосовано для синтезу плоских відбиваючих поверхонь, як елементів спеціальних дзеркал та антен з заданими діаграмоформуючими властивостями;

5) розвинуту дискретну модель та підхід до статистичного формулювання задачі оцінювання параметрів використано для ідентифікації кількості точкових розсіювачів, плоскі хвилі від яких реєструються багатоканальною антенною системою з лінійною антенною решіткою;

6) розв'язок задачі про оцінювання кутів падіння плоских хвиль на антенну решітку використано для побудови чотириканальної приймальної системи, що здатна забезпечувати стійкий прийом сигналу від джерела випромінювання над відбиваючою поверхнею в умовах багатошляхового поширення;

7) підхід до реконструкції поверхні у тривимірному просторі та метод погодження оптичних зображень цієї поверхні використано для встановлення трьох ортогональних складових векторного поля переміщень поверхні для дослідження деформації об'єктів під дією навантаження.

Як свідчать акти впровадження, результати досліджень використано при створенні багаточастотного вимірювального рефлектометра для виявлення місць розклеювання багатошарових композитів та впроваджено у Державному підприємстві «Антонов» для неруйнівного контролю обтікачів бортових радіолокаційних станцій. Метод обробки сигналів, що дозволяє усунути вплив когерентної завади впроваджено при проектуванні багатоканальної антенної системи у Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті. Окремі результати роботи впроваджено в ТЗОВ «Юнісервіс» при створенні системи автоматичної класифікації рослинності «Конттури» для аналізу даних від оптичного локатора та побудови методів фільтрації у тривимірному просторі. Теоретичні напрацювання впроваджено у навчальному процесі Державного університету штату Делавер (м. Довер, США), на кафедрі математичних наук, зокрема під час підготовки лекційних та практичних занять у рамках літньої навчально-дослідницької студентської програми «Числовий спектральний аналіз».

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.

Основні наукові результати дисертації відображені в 52 публікаціях, 23 з яких - у фахових виданнях України, в тому числі 8 публікацій опубліковано у наукових журналах, що входять до переліку провідних міжнародних наукометричних баз, і 29 матеріалів міжнародних наукових конференцій.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні отримані результати. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації

відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Структура та зміст дисертації.

Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 436 сторінок. Робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел з 315 найменувань та п'яти додатків, де представлено допоміжні математичні викладки та акти впровадження. Основний текст дисертації викладено на 336 сторінках.

У *вступі* розкрито сутність та стан наукової проблеми її значущість, підстави та вихідні дані для розробки теми, обґрунтування необхідності проведення дослідження, що подано у вигляді стандартних пунктів, які дають загальну характеристику дисертації.

У *першому розділі* на основі аналізу існуючих публікацій зроблено висновок щодо стану проблеми оцінки параметрів неоднорідних середовищ за розсіяним електромагнітним полем, в тому числі опрацьовано підходи до математичного моделювання процесів розсіювання електромагнітних хвиль в неоднорідних середовищах та на циліндричних тілах. Основну увагу приділено проблемі розв'язання відповідних обернених задач розсіювання.

У *другому розділі* розвинуто підхід до математичного моделювання процесів розповсюдження хвиль в плоских неоднорідних середовищах, в яких параметри матеріалу змінюються вздовж однієї осі кусково-неперервно. У відповідності до розробленої моделі у вигляді системи Дірака, знайдено розв'язок оберненої задачі розсіювання для функцій діелектричної проникності та провідності, за умови, що задано частотну залежність матриці розсіювання. На основі встановлених властивостей розв'язків Йоста створено рекурентну процедуру оцінки параметрів поверхонь розділу багат шарового середовища з однорідним матеріалом шарів за заданою частотною залежністю коефіцієнта відбиття. Розроблено також числовий алгоритм знаходження розв'язку системи інтегральних рівнянь, до якої зводиться обернена задача розсіювання для загального випадку, коли шукана функція матеріальних параметрів є кусково-неперервною. Результати демонструють те, що при строгому підході до розв'язання оберненої задачі вдається уникнути небажаних проявів «ехо»-відбиттів у реконструйованих функціях матеріальних параметрів, причиною яких є явища вторинного розсіювання хвилі на поверхнях розділу багат шарових середовищ.

Третій розділ присвячено оберненій задачі розсіювання хвилі на шаруватих структурах, які обмежено з однієї сторони ідеально провідним екраном. Такому сценарію розсіювання приділено увагу оскільки фізичні процеси в такій структурі дещо відрізняються від структури без екрану, а сфера практичного застосування таких композитів дуже широка. Враховуючи розроблений в попередньому розділі математичний апарат оцінювання параметрів структури без екрану, основною ідеєю, що розвинуто в третьому розділі є приведення обернених задач, а саме їх вихідних даних, до вихідних даних еквівалентної задачі без екрану. В цьому розділі запропоновано алгоритми встановлення електричної товщини діелектричної структури на екрані, а також показано, як можна знайти параметри

сферично-шаруватих структур за набором трансмісійних власних значень.

У четвертому розділі всебічно досліджено обернену задачу розсіювання для шаруватих структур, коли вихідні дані задано частково, а саме модулем коефіцієнта відбиття. Така задача виникла через складність вимірювання фази сигналу для широкого діапазону частот, в той час, як інструменти для здійснення вимірювань енергетичних параметрів відносно дешеві та прості. Тут продемонстровано, що обернена задача розсіювання має багато розв'язків, якщо вихідними даними є модуль коефіцієнта відбиття, або коефіцієнта проходження. Встановивши причину неоднозначності, автор виділив випадки, коли кількість розв'язків оберненої задачі може бути скінченною, оскільки в загальному випадку, розв'язків такої задачі є безмежна кількість. Окрім того запропоновано процедуру вимірювань, яка дозволяє за абсолютним значенням вихідних параметрів знайти однозначний розв'язок оберненої задачі.

П'ятий розділ присвячений розвитку моделей процесу розсіювання електромагнітних хвиль для випадків, коли плоска хвиля падає під кутом на плоско-неоднорідне середовище. В цьому розділі розроблено методи розв'язання оберненої задачі розсіювання відносно параметрів таких середовищ, якщо вихідними даними є комплексний коефіцієнт відбиття як функція кута падіння, що задано на фіксованій частоті. На прикладах показано, що запропоновані методи можна ефективно застосувати для вирішення задач синтезу шаруватих структур з заданими просторовими характеристиками відбиття плоских хвиль.

На відміну від попередніх розділів, де досліджено задачі, моделі яких можна описати звичайним диференціальними рівняннями, у **шостому розділі** основну увагу приділено багатовимірним випадкам розсіювання електромагнітних хвиль на контрастних розсіювачах. Для цього розсіяне поле запропоновано подавати у вигляді множини спостережень, що відповідають запропонованій загальній моделі. Крім того відмінність між полем, що описано такою моделлю та точним значенням параметрів, що спостерігаються, визначено похибкою, яка трактується як випадкова. Даний підхід дав можливість розглядати обернену задачу розсіювання як задачу статистичного оцінювання. В дисертації на різних прикладах показано ефективність застосування такого підходу до випадків розсіювання на ідеально-провідному та діелектричному розсіювачах, при цьому розглянуто також задачу, де вихідні дані задано для багатьох частот, і моделі вимірювальної системи з одною передавальною та одною приймальною антеною.

Дискретний варіант запропонованої багатовимірної моделі, що сформовано множиною спостережень, досліджено в **сьомому розділі**. Показано, що таку узагальнену модель можна застосувати для оцінювання кута падіння плоскої хвилі на лінійну та кругову антенну решітку. Модель ефективно застосовано до параметризації багаточастотних даних протягом дослідження плоскошаруватих структур, де виникає необхідність оцінювання коефіцієнтів в тригонометричних сумах (які отримано в другому

розділі дисертації) шляхом перерахунку коефіцієнта відбиття для множини дискретних частот у обмеженому частотному діапазоні. Як граничний випадок дискретної моделі, де розв'язок задачі оцінювання можна подати у явній формі, розглянуто двопробневу модель розповсюдження хвилі від джерела випромінювання, що розташоване над плоскою поверхнею розсіювання та розв'язано задачу забезпечення надійного прийому сигналу від такого джерела.

Восьмий розділ стосується оберненої задачі, яку інтерпретовано як високочастотне наближення оберненої задачі розсіювання, оскільки вихідними даними для такої задачі є некогерентні зображення об'єкту дослідження, що реєструються оптичними камерами. Задача полягає у реконструкції поверхні в тривимірному просторі за стерео зображеннями та оцінці поля тривимірних переміщень цієї поверхні у випадку її деформування. На відміну від підходів до розв'язання обернених задач, що досліджено у попередніх розділах, розв'язання такої задачі зведено до задачі мінімізації енергії. Для демонстрації дієвості розвинутого підходу виконано експеримент, що підтверджує працездатність цього підходу.

У висновках сформульовано основні наукові результати.

Автореферат дисертації адекватно відображає суть основних наукових положень, практичну значущість та висновки.

Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень, на основі яких захищена кандидатська дисертація.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію «Покращання якості обробки спеклу в когерентних радіолокаційних системах побудови зображень» за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи, у 2001 році в спеціалізованій раді при Національному університеті «Львівська політехніка», не використовуються як наукові результати докторської дисертації здобувача і не виносяться на її захист.

Зауваження до роботи.

- 1) Спрямовуючи дослідження на розв'язання обернених задач розсіювання в електродинаміці, автор недостатньо уваги приділив ефектам зміни поляризації в процесі розсіяння електромагнітних хвиль. Виникає питання, чи інформація про поляризацію розсіяної хвилі не є досить важливою інформаційною ознакою, яка б допомогла покращити якість оцінки параметрів середовища? Окрім того, в поляриметрії визначення матриці розсіювання відрізняється від того, що дане в дисертації, що бажано пояснити.
- 2) Двовимірні обернені задачі розсіювання, розв'язок яких запропоновано в шостому розділі дисертації також сформульовано для визначеного типу поляризації, при цьому недостатню увагу приділено випадкам падіння плоскої хвилі іншого типу поляризації, ніж досліджені у дисертації.
- 3) В шостому розділі дисертації розглянуто чотири типи обернених задач,

при цьому в кожній з них припускається, що тип розсіювача є апріорно відомий. Логічним є питання, чи будуть функціонувати описані методи розв'язання багатовимірних обернених задач розсіювання якщо немає інформації про тип розсіювача: чи він є ідеально-провідним, чи діелектричним, а може навіть і з проміжними властивостями?

- 4) Більшість досліджень, що проведені в роботі, стосуються багаточастотного принципу вимірювання електромагнітного поля. Незрозуміло, наскільки ефективно розроблені методи можна застосувати при реалізації вимірювань, що здійснюються імпульсним методом?
- 5) При вирішенні одновимірних задач, в дисертації основну увагу приділено випадкам фіксованого кута та нормального падіння плоских хвиль, а роздільна здатність забезпечується багаточастотним вимірюванням коефіцієнта відбиття у широкому діапазоні частот. Залишається невиясненим, чи вдасться отримати кращу точність оцінювання матеріальних параметрів, якщо вихідні дані доповнити вимірюваннями коефіцієнта відбиття для кількох кутів, які відмінні від нормального.
- 6) Не висвітлено питання оцінки параметрів багаточастотної структури з однорідними шарами, діелектричний матеріал яких є втратним. Така модель відповідає більшості реальних об'єктів дослідження, в той час шаруваті структури з безвтратним діелектричним матеріалом, є лише ідеалізованою моделлю. Це ж зауваження стосується властивості анізотропії матеріалів діелектриків, які часто використовують при побудові композитних матеріалів.
- 7) Останній розділ роботи, який присвячено оберненій задачі розсіювання для оптичного діапазону хвиль, стоїть дещо осторонь від основної ідейної лінії, що проведена в роботі. Зокрема, не проаналізовано, наскільки розвинуті в цьому розділі роботи методи можуть бути застосовані до радіолокаційних та радіометричних зображень, що отримано в радіохвильовому діапазоні.
- 8) За рахунок неперервного руху носія вимірювальної радіолокаційної системи з синтезованою апертурою відносно об'єкту дослідження, доплерівські зміщення частоти є невід'ємним ефектом, більш того, вони є фізичною основою ефекту стиснення променю. Виникає питання, наскільки наявність доплерівського зсуву частоти вплине ефективність застосування розвинутих моделей і методів при їх імплементації для обробки сигналів в реальних системах, розташованих на рухомих носіях.

Незважаючи на висловлені зауваження, в цілому дисертація справляє дуже позитивне враження завдяки ґрунтовності теоретичних досліджень та практичного значення використання її результатів.

Загальні висновки.

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Синявського Андрія Тадейовича на тему «Математичні моделі для підвищення ефективності оцінки параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного електромагнітного поля» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані та практично

важливі результати, що у сукупності вирішують науково-технічну проблему розвинення теорії математичного моделювання процесів поширення хвиль в неоднорідних середовищах з використанням загального підходу до заміни електродинамічної моделі, моделлю потенціального розсіювання та статистичним описом процесів розсіювання на неоднорідностях. Отримані результати дають підстави стверджувати, що автором створений єдиний підхід до оцінювання параметрів таких середовищ завдяки встановленим аналітичним властивостям функцій та статистично обґрунтованим процедурам розв'язання обернених задач розсіювання, що, як наслідок, привело до підвищення точності оцінок разом зі зменшенням обчислювальної складності методів їх отримання.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема пунктів 1, 2 у розділі II.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо докторських дисертацій, а її автор – Синявський Андрій Тадейович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Завідувач кафедри електроніки
Національного авіаційного університету
Міністерства освіти і науки України
Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки
IEEE Fellow
д.т.н., професор

Яновський Ф. Й.

Підпис професора Яновського Ф. Й. завіряю
Проректор НАУ



Шульга В.П.