67-72-93/3
26.08.16

ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

професора Костробія Петра Петровича
на дисертаційну роботу
Синявського Андрія Тадейовича
"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 дослідження

Розробка методів оцінювання параметрів та структурних характеристик матеріалів в випадку ускладнення або неможливості безпосереднього вимірювання є надзвичайно важливою практичною задачею. В основу побудови таких методів дослідження закладено математичне моделювання опису явищ розсіювання хвильових полів різної природи (обернені задачі розсіяння та обернені граничні задачі). Це дозволяє на підставі отриманих експериментальних даних встановити складні взаємозв'язки між величинами, які характеризують досліджуваний об'єкт. Обернені задачі, на відміну від прямих задач розсіяння (в основу яких покладено базові моделі рівнянь математичної фізики), вимагають концептуально нових підходів (існуючі на сьогодні методі комп'ютерного моделювання є малоприйнятні) до математичного моделювання обернених задач, які, зокрема, дозволяли б будувати процедурне розв'язування цих задач, виходячи з критерію мінімізації похибок в оцінці параметрів об'єкту дослідження.

Крім того, методі оцінювання параметрів матеріалів та їх структури непрямими методами мають значну практичну цінність, оскільки складають основу обробки результатів вимірювань в системах та засобах неруйнівного контролю.

Створення таких математичних моделей та методів інтерпретації даних вимірювань розсіяного електромагнітного поля довкола об'єктів дослідження є метою дисертаційної роботи, **актуальність** якої полягає в розвитку теорії математичного моделювання та теорії обернених задач розсіяння для підвищення ефективності засобів оцінювання параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного поля.

Для досягнення сформульованої в дисертаційній роботі та в авторефераті мети розв'язано ряд науково-прикладних задач, серед яких слід відмітити наступні:

- встановлення залежності між параметрами рівнянь електромагнітного поля та фундаментальних рівнянь з теорії потенціального розсіювання, що дало змогу створити нові моделі для опису розповсюдження електромагнітних хвиль в плоско-шаруватому середовищі;
- розвинення підходів до оцінювання параметрів плоскошаруватих середовищ з кусково-неперервними функціями їх матеріальних параметрів за частотною залежністю коефіцієнта відбиття, в тому числі заданого в обмеженому частотному діапазоні;
- проаналізовано обернені задачі, які зводяться до моделі потенціального розсіювання на півосі, та запропоновано математично строгі їх розв'язки та розв'язки, що є прийнятним для практичного застосування;
- створення та дослідження моделі для опису просторової та частотної залежності розсіяного поля електромагнітного поля довкола циліндричного розсіювача, яка дозволяє трактувати результати спостереження як сукупність реалізацій випадкового процесу, що, відповідно, дає можливість використати усереднення для побудови статистично коректних оцінок невідомих параметрів;
- розроблення стратегії побудови методів для оцінки границі контрастних об'єктів, координат дискретних розсіювачів та характеристик поверхонь розділу в шаруватих структурах за допомогою індикаторних функції.

Обгрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні результати, отримані здобувачем і викладені у восьми розділах основної частини дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані як аналітично, так і результатами комп'ютерного моделювання та результатами проведених експериментальних досліджень.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним приведенням сформульованих задач оцінювання параметрів неоднорідних середовищ до розв'язаних і відомих в літературі задач функціонального аналізу, теорії функцій комплексної змінної, інтегральних рівнянь та рівнянь математичної фізики, а також використанням сучасних методів числового аналізу при реалізації отриманих в неявному вигляді результатів та порівнянні останніх з відомими. В дисертаційній роботі присутня значна кількість тверджень та теорем, які автор строго доводить, забезпечуючи тим самим беззаперечний рівень достовірності. Окрім того, розроблені в роботі загальні моделі та методи критично перевіряються автором для часткових випадків з відомим аналітичним розв'язком.

Наукова новизна досліджень

У дисертаційні роботі А. Т. Синявського розроблено новий науковий напрямок математичного моделювання процесів розсіяння електромагнітних хвиль при поширенні їх в неоднорідних середовищах та побудові методів оцінювання параметрів таких середовищ за відомими виміряними характеристиками розсіяного поля.

В процесі проведених досліджень автором отримано ряд нових наукових результатів, серед яких слід відмітити наступні.

- Запропоновано та досліджено математичну модель поширення електромагнітної хвилі у плоскошаруватому середовищі із втратами при нормальному падінні та розроблено ефективну числову схему розв'язання обернених задач розсіювання відносно неперервних функцій діелектричної проникності та провідності за відомою матрицею розсіювання електромагнітних хвиль за допомогою використання методів потенціального розсіяння. Розроблено та реалізовано числовий метод розв'язання.

- Побудовано новий метод розв'язання оберненої задачі розсіювання за коефіцієнтом відбиття для багатошарових структур із однорідними безвтратними матеріалами шарів за умови нормального падіння плоскої хвилі, висока точність якого, на відміну від відомих в літературі підходів, досягається за рахунок відомих в теорії потенціального розсіяння розв'язків Йоста.
- Запропоновано та досліджено новий підхід до реконструкції функції діелектричної проникності за заданою функцією коефіцієнта відбиття нормально падаючої плоскої хвилі, який передбачає реконструкцію наявних у шуканій функції розривів в точках, які відповідають поверхням розділу середовищ, та неперервної складової функції матеріальних параметрів, які по-різному визначають асимптотичну поведінку комплексного коефіцієнта відбиття.
- Розроблено новий підхід до визначення діелектричних параметрів шаруватої структури за значеннями модуля коефіцієнта відбиття та показано можливість однозначного розв'язку такої задачі за умови відомих додаткових даних. Такий підхід дав можливість виділити випадки, коли на практиці можна побудувати скінчену кількість плоско-шаруватих діелектричних структур, що мають однакову функцію модуля коефіцієнта відбиття.
- Запропоновано нову математичну модель подання діаграми розсіювання у вигляді інтегрального перетворення функцій, які мають випадковий характер і можуть досягати максимального значення лише на границі розсіювача, та показано, що така модель може служити теоретичним обґрунтування багатьох наближених розв'язків оберненої задачі розсіювання.
- Розвинуто стратегію побудови методів розв'язання обернених задач розсіювання на основі запропонованої статистичної моделі, яка полягає у знаходженні індикаторних функцій для встановлення границі розсіювачів за значеннями розсіяного поля. На відміну від відомих підходів, така стратегія передбачає статистично обґрунтований підхід до знаходження розв'язку оберненої задачі розсіювання.
- Запропоновано новий метод визначення координат точкового джерела випромінювання над діелектричною поверхнею з невідомими параметрами,

що полягає у здійсненні відповідної обробки сигналів при двопроменевій моделі розповсюдження та реєстрації їх лінійною чотириелементною антенною решіткою.

- Розроблено числовий метод розв'язання системи рівнянь типу Гельфанда-Левітана-Марченка, який в дисертації застосовано до розв'язання одновимірних обернених задач розсіювання. Важливе значення цього методу полягає у тому, що він дає можливість також числово знаходити розв'язки широкого класу еволюційних нелінійних диференціальних рівнянь, що належать до таксономії AKNS, так як в них використовується «метод оберненої задачі розсіювання».

Практичне значення результатів дисертаційної роботи визначається ефективним використання розроблених методів розв'язання обернених задач розсіювання для таких задач.

1) Задача встановлення параметрів неоднорідних середовищ за виміряними даними про розподіл розсіяного поля, або виміряний коефіцієнт відбиття.

Розроблені математичні методи спрямовані на практичну імплементацію як процедури обробки сигналів у засобах неруйнівного контролю та діагностики матеріалів. Такий підхід дозволив аналізувати діелектричні матеріали неруйнівними методами та ідентифікувати розшарування і відхилення параметрів шарів від технологічно заданих значень. Крім того результати дозволяють здійснити неруйнівний контроль якості діелектричної ізоляції чи протикорозійних захисних покривів.

2) Задача візуалізації границь контрастних розсіювачів та вимірювання координати дискретних розсіювачів за дистанційно виміряними даними.

Отриманий в дисертації результат дає можливість коректно будувати обробку та здійснювати інтерпретацію даних від георадарів та при дистанційному зондуванні радіолокаційними засобами, де виникає задача ідентифікації нелокальних об'єктів, розміри яких перевищують довжину хвилі. Розроблені методи можна імплементувати при виготовленні відповідних радіолокаційних систем та при експериментальних дослідженнях у наукових установах, що

здійснюють інтерпретацію радіовимірювань, зокрема опрацювання геологічних та археологічних даних отриманих методами електромагнітного високо частотного зондування.

3) Задача синтезу середовищ з заданими властивостями розсіювання.

Запропонований метод синтезу базується на розв'язанні оберненої задачі розсіювання та дозволив проектувати прохідні та відбиваючі фільтри, поверхні з заданою частотною, або кутовою залежністю коефіцієнта відбиття. Такі елементи мають широку сферу використання: від поглинаючих матеріалів, плоских антенних систем до елементів просвітленої оптики.

Практичне значення результатів дисертації підтверджено чотирма актами впровадженнями.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини (містить вісім розділів), висновків, переліку літератури та додатків.

У ***вступі*** подано коротку характеристику роботи, сформульовано основні наукові результати та їх практична значимість.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану проблеми математикного моделювання процесів розсіювання електромагнітних хвиль з огляду на важливість розв'язку обернених задач розсіювання, як фундаментних засад здійснення коректного опрацювання виміряних даних з метою встановлення характеристик неоднорідних середовищ, де електромагнітна хвиля зазнає розсіювання. Окремо здійснено критичний аналіз відомих методів розв'язання обернених задач розсіювання для одновимірного та багатовимірного випадків.

Другий розділ стосується вибору альтернативної моделі опису процесу розсіювання нормально-падаючої плоскої електромагнітної хвилі у втратному плоско-неоднорідному середовищі. Показано, що використання квантово-механічних моделей потенціального розсіяння,до яких можна коректно звести задачі розсіяння електромагнітних хвиль, дозволяє запропонувати нові підходи до розв'язання одновимірних обернених задач розсіяння.

Дослідженню окремого класу обернених задач розсіяння та обернених спектральних задач (задачі типу задач Гільберта-Рімана) присвячений ***третій розділ*** дисертаційної роботи. Подано як нові теоретично обґрунтовані строгі розв'язки таких задач, так і практично корисні наближені розв'язки. Ці розв'язки отримано завдяки запропонованому у другому розділі моделювання опису розсіяного поля.

Якщо в попередніх розділах частковий характер вихідних дані для оберненої задачі розсіювання стосувався лише обмеження на смугу частот для коефіцієнта відбиття, то у ***четвертому розділі*** досліджено питання можливості розв'язання оберненої задачі розсіювання, для якої вихідні дані задано лише абсолютним значенням комплексно-значної функції. Особливого значення тут набуває задача встановлення фази аналітичної функції за її модулем. В загальному випадку така задача має безліч розв'язків. Проте прискіпливий аналіз аналітичних властивостей розв'язків Йоста дав можливість виділити випадки, коли кількість розв'язків оберненої задачі розсіювання є скінченим.

П'ятий розділ містить наукові результати отримані автором роботи, де вперше продемонстровано можливість граничного переходу від одновимірної до багатовимірної оберненої задачі розсіювання для фіксованої частоти. Як об'єкт дослідження тут розглянуто плоско-шарувату структуру з невідомими параметрами, а вихідними даними для сформульованої оберненої задачі розсіювання є кутова залежність коефіцієнта відбиття. Показано, що таку задачу можна розв'язати, використовуючи методи квантово-механічної теорії потенціального розсіяння.

В ***шостому розділі*** автор, виходячи з досвіду побудови методів статичного оцінювання та аналізу функцій, розвиває підхід до моделювання зареєстрованого електромагнітного поля у вигляді множини незалежних спостережень, що є наслідком розсіювання на об'єкті. Запропонована модель є наближеною, має статистичний характер та записаний в інтегральній формі.

Впровадження такої моделі дозволило сформувати загальну стратегію побудови індикаторних функцій, які дають можливість розв'язувати обернені

задачі розсіювання шляхом ідентифікації границь розділу середовищ. Дієвість такого підходу підтверджено практичними прикладами.

Сьомий розділ є логічним продовженням попереднього, де загальну модель та стратегію побудови індикаторних функцій застосовано до часткових випадків, а саме, для випадків дискретного розсіювання. Показано, що такий підхід до встановлення індикаторних функцій є теоретично виправданим для визначення параметрів поверхонь розділу при вирішенні одновимірних обернених задач розсіювання за вихідними даними, які задано для скінченого діапазону частот. Іншими частковими випадками є побудова методів обробки сигналів в антенних решітках.

У ***восьмому розділі*** дисертаційної роботи розглянуто обернену задачу, яка виникає оптичних вимірювальних системах, де за оптичними зображеннями необхідно встановити поверхню об'єкту в тривимірному просторі та оцінити переміщення її елементів, якщо цей об'єкт є динамічним. Сформульовану задачу зведено до задачі мінімізації енергії, показано числову схему вирішення такої екстремальної задачі та експериментально продемонстровано ефективність запропонованого методу.

У ***висновках*** викладено основні наукові результати роботи.

Структура дисертації логічна, відповідає меті та поставленим у роботі завданням. Наукові терміни у роботі вжиті коректно. Пояснення у тексті супроводжуються необхідною кількістю рисунків, таблиць та математичними викладками. На всі рисунки, таблиці, а також літературні джерела, є посилання у тексті. Робота виконана на високому теоретичному рівні, а її обсяг відповідає змістовному наповненню, незважаючи на те, що кількість сторінок дещо перевищує рекомендовану кількість для докторських дисертацій.

Результати роботи опубліковано в 23 статтях у наукових журналах і збірниках наукових праць та у 29 матеріалах провідних Міжнародних наукових конференцій. З них 8 статей опубліковано у закордонних журналах і спеціальних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз, зокрема, Scopus, ISI, SCI, IET, Zentrblatt, Engineering Village, Ei Compendex, ResearchGate, IEEE Xplore та ін та ін..

Вищенаведене дає підставу стверджувати, що публікації за темою роботи відповідають встановленим вимогам ДАК МОН України. Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи ідентичні наведеним у авторефераті.

Розглянута дисертаційна робота та автореферат не позбавлені певних недоліків і викликають ряд **зауважень**. Відзначу наступні.

1) Основною ідеєю роботи є використання локального наближення для взаємозв'язку векторів напруженості електричного поля $\mathbf{E}$ та індукції $\mathbf{D}$, тобто $\mathbf{D}(\mathbf{r},t)=\varepsilon(\mathbf{r},t)E(\mathbf{r},t)$, де $\varepsilon(\mathbf{r},t)$ – діелектрична функція середовища. Таке наближення обґрунтоване для діелектричних систем у випадку, коли $\lambda >> \langle \mathbf{r} \rangle$ (λ – довжина хвилі електромагнітного поля, $\langle \mathbf{r} \rangle$ – характерна віддаль), а сама система є трансляційно-інваріантною. Для шаруватих діелектричних систем, де є порушення трансляційної інваріантності, а розміри шарів вздовж однієї з осей координат можуть бути спів мірні з λ, взаємозв'язок варто було б обґрунтувати.
2) Використання результатів квантово-механічної теорії розсіяння у вигляді борнівського ряду для розрахунку характеристик розсіяного електромагнітного поля вимагає дослідження можливості застосування такого подання. Борнівське наближення справедливе для потенціалів розсіяння з заданим радіусом дії a для випадку швидких частинок автоматичне перенесення таких висновків на розглядувані в роботі задачі потребує обґрунтування, а особливо для розгляду шаруватих діелектричних структур.
3) Не продемонстровано, як можна в багатомірному випадку реконструювати неоднорідну частину розсіювача та встановити розподіл його електричних параметрів. Розроблені в дисертації методи розв'язку багатовимірних обернених задач розсіювання дають можливість лише встановити границі розсіювачів.
4) Останній розділ виглядає відірваним від основної частини роботи, оскільки методи і моделі розвинуті в попередніх розділах не використовуються для розв'язання сформульованої в останньому розділі задачі. Сформульо-

вана задача має зовсім іншу природу, так як вихідні дані для такої задачі пов'язані з розсіюванням електромагнітних хвиль оптичного діапазону, а об'єкт досліджень є динамічним, а отже, методи її розв'язання істотно відрізнятимуться.

5) В тексті дисертації, за винятком вступу, терміни «рівняння Шредінгера» та «рівняння Дірака» насправді мають зміст «рівняння типу Шредінгера» та «рівняння тиру Дірака». Автор дисертації про таку підміну термінів згадує лише коротко в другому розділі, що є не зовсім коректно.

Однак, ці зауваження суттєво не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи, її наукову новизну тавикладення дисертантом матеріалів його досліджень.

Загальний висновок

У дисертаційній роботі Синявського А. Т. розв'язана важлива науково-технічна проблема розвинення теорії математичного моделювання процесів розсіювання електромагнітних хвиль та підвищення ефективності методів оцінювання параметрів неоднорідних середовищ шляхом розв'язання відповідних обернених задач розсіювання.

Розроблена загальна математична модель базується на підході до моделювання процесів розсіювання електромагнітних хвиль за рахунок використання положень квантово-механічної теорії потенціального розсіювання та статистичному підході до інтерпретації даних про виміряні значення розсіяного поля.

На основі розробленої математичної моделі автору дисертації вдалося побудувати ряд нових аналітико-числових і числових методів та алгоритмів розв'язування обернених задач розсіювання, що враховують наявність поверхонь розділу в неоднорідних середовищах, параметри яких оцінюються, та частковий характер вихідних даних, що пов'язано з умовами практичної реалізації їх реєстрації. Порівняльний аналіз проведений в дисертації підтверджує кращу ефективність запропонованих методів у порівнянні з відомими.

Структура та об'єм тексту відповідають встановленим для докторських дисертацій вимогам. Плагіат не прослідковується, робота не містить матеріалів кандидатської дисертації.

Дисертаційна робота Синявського А. Т. на тему "Математичні моделі для підвищення ефективності оцінки параметрів неоднорідних середовищ за відомим розподілом розсіяного електромагнітного поля", подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — "математичне моделювання та обчислювальні методи", відповідає вимогам п. п. 9, 10 та 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а здобувач Синявський Андрій Тадейович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри прикладної математики
Національного університету
"Львівська політехніка" П. П. Костробій

Підпис професора Костробія Петра Петровича засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
"Львівська політехніка" Р. Б. Брилинський