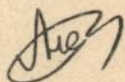


ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Андрєєв Михайло Вікторович



**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШАРУВАТИХ
ДИЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУР БАГАТОЧАСТОТНИМИ
МЕТОДАМИ НА ОСНОВІ ПОШУКУ КВАЗІРОЗВ'ЯЗКУ**

01.04.03 - Радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ДНІПРОПЕТРОВСЬК - 1997

534.86

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00343986 (X)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики НВЧ радіофізичного факультету
Дніпропетровського державного університету.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, с. н. с.
Дробахін О.О.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Ахметшин О.М.

кандидат технічних наук Славін І.В.

Провідна організація: Харківський державний університет

Захист відбудеться "24" квітня 1997 року о "14"
годині на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради К 03.01.12 пб
захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-
математичних наук при Дніпропетровському державному
університеті за адресою: 320050, м. Дніпропетровськ, пр. Науковий,
13, радіофізичний факультет, корп. 12, ауд. 512.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці
Дніпропетровського державного університету

Автореферат розісланий "22" березня 1997 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Вченої Ради
канд. фіз.- мат. наук, доцент

М. Ф. Буланій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні тенденції підвищування контролю за якістю продукції та станом навколишнього середовища вимагають опрацювання нових методів та засобів вимірювань. Особливо актуальним стає вимірювання (контроль) параметрів різних об'єктів безконтактними методами. Останнім часом все частіше для зазначених задач застосовують радіохвильові і оптичні методи вимірювань, наприклад, під час досліджень і моніторингу поверхні Землі і світового океану, для зондування природних ресурсів з борту літальних апаратів, під час дослідження внутрішніх органів людини, у неруйнуючому контролі якості виробів та в багатьох інших задачах прикладної радіофізики. Зокрема, знаходять застосування методи НВЧ зондування.

Наявність кореляції між діелектричною проникністю і фізико-механічними властивостями матеріалу дозволяє окреслити доволі широке коло задач, для яких достатньо визначати одновимірний розподіл діелектричної проникності структури по глибині. В багатьох випадках достатньо знати кусково-постійну апроксимацію цього профілю, що зводить ці задачі до можливості визначення лише кінцевої кількості параметрів шаруватої структури: товщин шарів d_m та діелектричних проникностей шарів ϵ_m ($m=1..L$). При цьому може бути поставлена і додаткова задача визначення кількості шарів L .

Для визначення параметрів L -шарової структури необхідно не менш $3L$ незалежних вимічених дійсних значень. Це обумовлює необхідність застосування багатопараметрових методів через те, що традиційні одночастотні радіохвильові методи не можуть забезпечити вирішення поставлених задач у принципі.

Аналіз сучасного стану радіофізичних методів визначення параметрів шаруватих діелектричних структур (ШДС) при однібічному доступі до об'єкту дослідження, реалізованих на НВЧ, показує, що, незважаючи на різноманіття методів, практичне втілення і реалізацію у вигляді реально працюючих вимірювальних комплексів дістали методи на основі вимірювання частотної

залежності коефіцієнта відбиття (КВ) на багатьох частотах з використанням перетворення Фур'є для аналізу у часовій області. Однак, недостатня розділювальна здатність через обмеженість ширини смуги частот вимірювань F не дозволяє їх використовувати для визначення параметрів ШДС, що мають "тонкі" ($1 \leq 2Fd_m\sqrt{\epsilon_m}/c \leq 2$, де c - швидкість світла) або "надтонкі" ($2Fd_m\sqrt{\epsilon_m}/c \leq 1$) шари. Для підвищення розділювальної здатності можливо використання методів параметричного спектрального аналізу, таких як метод Проні та узагальнений метод жмутка функцій, але ці методи надзвичайно чутливі до наявності шуму у даних. Потенційно якнайбільшу розділювальну здатність, точність та стійкість до шуму мають методи на основі параметричної мінімізації функціоналу відхилення моделі від вимірених даних, що дають змогу знаходити квазірозв'язок зазначеної оберненої задачі, однак їх ефективність в значній мірі залежить від вигляду обраної моделі, вибору алгоритму пошуку квазірозв'язку, кількості апріорної інформації щодо об'єкту дослідження та точності завдання початкового наближення. Усе це зумовлює актуальність поставленої в дисертації теми досліджень.

Метою даної роботи є: теоретичний розвиток і експериментальне дослідження стійкого методу розв'язку одновимірної оберненої задачі для структури з кусково-постійним профілем діелектричної проникності, яка може мати у своєму складі "тонкі" і "надтонкі" шари, з урахуванням властивостей реальної зондуючої хвилі на основі пошуку квазірозв'язку за даними вимірювань КВ у вільному просторі на багатьох частотах. Це обумовлює необхідність вирішення наступних задач:

- здійснити вибір моделі КВ, що враховує властивості реальної зондуючої хвилі та є оптимальною для ефективного пошуку квазірозв'язку;
- дослідити властивості цільової функції (ЦФ), що використовується для пошуку квазірозв'язку, з урахуванням вимірювань КВ на сітці частот у НВЧ діапазоні;
- розробити простий та стійкий алгоритм пошуку квазірозв'язку, який би вирішував проблему вибору початкового

наближення;

- знайти шляхи регуляризації, які б вели до фізично обґрунтованих результатів і дозволяли визначати параметри структур з "тонкими" і "надтонкими" шарами;

- здійснити дослідження і тестування розроблених підходів шляхом чисельного моделювання та реального експерименту.

Внаслідок проведених досліджень були отримані наступні основні результати, що виносяться на захист:

1. Метод розв'язування одновимірної оберненої задачі для діелектричної структури з кусково-постійним профілем діелектричної проникності шляхом пошуку квазірозв'язку з використанням спеціального вигляду адитивної експоненціальної моделі КВ структури за даними вимірювань КВ у вільному просторі на сітці частот.

2. Методика розширення області однозначності визначення параметрів шаруватої структури методом квазірозв'язку (МКР) за даними смугових вимірювань КВ на сітці частот шляхом збільшення розмірів області унімодальності і періода ЦФ за рахунок введення комплекснозначності амплітуд в адитивну модель КВ, підбирання значень початкової частоти діапазону вимірювань та частотного дискрету з найменшим значенням їх найбільшого спільного дільника, використання вагових функцій під час побудови ЦФ.

3. Алгоритм рекурентного розрахунку ЦФ, який дозволяє використовувати нетрадиційний метод регуляризації на основі пошуку псевдорозв'язку, нормального відносно розв'язку лінійної задачі на одиницю меншої вимірності, що веде до отримання фізично коректних результатів.

4. Практична реалізація методу пошуку квазірозв'язку для визначення параметрів ШДС за даними багаточастотних вимірювань КВ, включаючи вирішення проблеми вибору початкового наближення на основі алгоритму послідовного нарощування порядку моделі, процедуру врахування малих перевідбивань і методику вибору вірного знаку парціальних коефіцієнтів відбиття меж поділу шарів.

Наукова новизна та теоретична цінність роботи полягає:

- у розвитку математичного апарату стійкого розв'язування

обернених задач для шаруватих структур з урахуванням реальних властивостей зондувальної хвилі НВЧ діапазону;

- у розробці метода послідовного нарощування порядку моделі із запровадженням регуляризації квазівінеровського типу, що на відміну від традиційних методів регуляризації веде до фізично обґрунтованих результатів і можливості розв'язування оберненої задачі для структур з "надтонкими" шарами;

- у використанні під час обчислення ЦФ значень часового сигналу, отриманого за допомогою перетворення Фур'є вимірної частотної залежності КВ, що дозволяє зменшити обсяг обчислювань на сітці параметрів;

- у розробці методики розширення області однозначності визначення параметрів шаруватої структури методом квазірозв'язку за рахунок підбору значень частот вимірювань і використання вагових функцій під час побудови ЦФ.

Практична цінність роботи полягає у створенні алгоритмів розв'язування оберненої задачі для ШДС, які відрізняються високою розділювальною здатністю і малою трудомісткістю та дозволяють вирішувати задачі оперативного неруйнуючого контролю виробів з прошарованих діелектриків, контролювати параметри антенних об'єктів і укрить. З огляду на загальність розроблених підходів запропонований апарат може бути застосований для локалізації неоднорідностей у трактах радіофізичної апаратури та телекомунікаційних систем.

Методи досліджень: експериментальні, аналітичні, чисельні при моделюванні на ЕОМ та ймовірно-статистичні при аналізі характеристик оцінок розробленого методу. У роботі використані математичний апарат методів розв'язування обернених задач радіофізики, поняття та методи статистичної радіофізики в області теорії приймання та обробки сигналів, апарат теорії матриць і лінійної алгебри, методи теорії розв'язування екстремальних задач і задач оптимізації, апарат параметричного спектрального аналізу, а також методи багаточастотних широкосмугових вимірювань на НВЧ.

Обґрунтованість та вірогідність наукових результатів дисертації підтверджується можливістю фізичного пояснення, чисельним моделюванням та експериментальними дослідженнями

зразків з відомими параметрами. Результати чисельного моделювання зіставляються з очікуваними результатами аналітичних розрахунків та з результатами застосування відомих методів. Коректність використаних у роботі підходів підтверджується результатами їх тестування за даними експериментальних досліджень зразків, параметри яких відомі із паспортних даних, та кількісним збігом оцінок шуканих параметрів та їх очікуваних значень.

Апробація роботи. Основні результати та висновки роботи були представлені та обговорювалися на 3-й Кримській конференції "НВЧ-техніка і супутникове приймання" (Севастополь, 1993), Міжнародному симпозиумі "Фізика і техніка міліметрових та субміліметрових хвиль" (Харків, 1994), Міжнародній конференції "Математичні методи електромагнітної теорії" (Харків, 1994), I Українській конференції "Технічна діагностика і неруйнуючий контроль в Україні" (Дніпропетровськ, 1994), Міжнародній наук.-техн. конференції "Сучасна радіолокація - 94" (Київ, 1994), 2-й Міжнародній наук.-техн. конференції "Актуальні проблеми електронного приладобудування" АПЕП-94 (Новосибірськ, Росія, 1994), 15-му Міжнародному Симпозиумі URSI з електромагнітної теорії (С.-Петербург, Росія, 1995), 5-му Міжнародному Симпозиумі "Сучасні досягнення в мікрохвильовій технології" ISRAMT'95 (Київ, 1995), Міжнародній конференції "Теорія і техніка передавання, приймання і обробки інформації" (Туапсе, Росія, 1995), Міжнародній конференції "Теорія і техніка антен" МККТА'95 (Харків, 1995), Міжнародній конференції з точних електромагнітних вимірювань СРЕМ-96 (Брауншвейг, Німеччина, 1996), 2-й Міжнародній конференції "Супутниковий зв'язок" (Москва, Росія, 1996), а також на щорічних підсумкових наукових конференціях Дніпропетровського державного університету. Доповідь з теми дисертації була прийнята на XIV Всесвітню конференцію з неруйнуючого контролю (Делі, Індія, 1996).

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 18 друкованих праць, список яких наведено у кінці автореферату.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури із 174 найменувань та додатку. Загальний об'єм дисертації складає 212 сторінок, з яких 150 сторінок основного тексту, 30 малюнків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обгрунтовані актуальність та практичне значення роботи, приведено огляд публікацій з питань визначення параметрів діелектричних структур, сформульовані мета роботи і основні результати, які виносяться на захист.

У першому розділі роботи розглянута концепція квазірозв'язку, за якою виконується розв'язування оберненої задачі визначення параметрів ШДС по частотній залежності КВ, введена цільова функція, за якою шукається квазірозв'язок, обрана модель КВ, яка є ефективною для пошуку квазірозв'язку, показано зв'язок процедури мінімізації ЦФ під час пошуку квазірозв'язку з аналізом даних у часовій області і вигляд ЦФ при використанні даних вимірювань КВ у смузі частот кінцевої ширини. Оскільки при вимірюванні на реальних установках КВ містить у собі разом з корисною інформацією ще деякий шум і може не належати до простору розв'язків прямої задачі, то для стійкого визначення параметрів ШДС за даними вимірювань частотної залежності КВ необхідно використовувати узагальнення розв'язку оберненої задачі - квазірозв'язок, знаходження якого зводиться до мінімізації функціоналу відхилення модельних даних від виміряних (для скінченномірною випадку цільової функції). Використання традиційної для цих задач моделі плоскошаруватої структури у плоскохвильовому наближенні призводить до зайвої багатоекстремальності ЦФ. Для спрощення пошуку квазірозв'язку запропоновано використовувати адитивну модель КВ з кінцевою кількістю доданків у вигляді

$$R_M(\omega, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M, R_1, R_2, \dots, R_M) = \sum_{m=1}^M R_m \cdot \exp(-j\omega\tau_m), \quad (1)$$

де ω - циклічна частота, τ_m - часове місцезнаходження m -ої межі поділу, яке є лінійною комбінацією часів проходження хвилі у шарах ШДС, R_m - величина, яка пропорційна КВ m -ої межі поділу і є деякою комбінацією коефіцієнтів Френеля з урахуванням властивостей реальної зондувальної хвилі, M - кількість меж поділу ШДС. Таке адитивне зображення КВ дозволяє спростити роботу алгоритмів оптимізації за рахунок скорочення кількості локальних екстремумів ЦФ, орієнтації ярів ЦФ повздовж коор-

динатних вісей простору параметрів і зниження вимірності задачі нелінійної оптимізації внаслідок розв'язування лінійної задачі пошуку квазірозв'язку по амплітудах R_m , а також використовувати перехід до часової області за допомогою перетворення Фур'є з метою вибору початкового наближення.

У другому розділі роботи розглянуті особливості пошуку квазірозв'язку і поведінка ЦФ при визначенні параметрів ШДС за даними вимірювань смугового спектру КВ у НВЧ діапазоні на дискретній сітці частот, а також шляхи збільшення інтервалу однозначності визначення параметрів ШДС. Для зазначеної моделі ЦФ набуває вигляду

$$\rho(\vec{r}, \vec{r}) = \|\vec{R} - \vec{R}_M\|_2^2 = \|\vec{R}\|_2^2 - 2 \operatorname{Re}\{\vec{G}^H \cdot \vec{r}\} + \vec{G}_M^H \cdot \vec{r}, \quad (2)$$

де $\vec{r} = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M\}$ і $\vec{r} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ - вектори місцезнаходжень меж поділу шарів і амплітуд відбиття від них; \vec{R} - вимірена частотна залежність КВ; \vec{G} - відліки синтезованого за частотною залежністю \vec{R} часового сигналу у моменти часу $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M\}$; \vec{G}_M - модельний часовий сигнал у відліки часу $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M\}$. Якщо пошук квазірозв'язку виконується за даними вимірювань тільки модуля КВ або однієї з квадратурних компонентів КВ, то це призводить до виникнення додаткових глобальних мінімумів ЦФ, що заважає визначенню справжніх параметрів ШДС, особливо у випадку "тонких" та "надтонких" структур. За наявності інформації лише про модуль КВ необхідно під час пошуку квазірозв'язку використовувати частотну залежність його квадрату, а не першої степені, для зниження кількості зайвих мінімумів ЦФ. Вимірювання КВ на дискретній сітці частот спричиняє появу періодичності ЦФ, що обмежує область однозначності визначення параметрів ШДС, однак за рахунок спеціального добору значень частот вимірювань можливо її розширювання. Побудована за даними смугових вимірювань ЦФ, як і синтезований часовий сигнал, є багатоекстремальною функцією, що заважає пошуку квазірозв'язку. Використання комплекснозначних амплітуд \vec{r} дає змогу значно розширити область унімодальності ЦФ, наприклад, для 8-мм НВЧ діапазону в 5.3 рази. Вилучення комплекснозначних амплітуд \vec{r} з числа параметрів ЦФ за раху-

нок розв'язування відповідної лінійної задачі пошуку квазірозв'язку за амплітудами веде не тільки до зниження вимірності задачі нелінійної оптимізації, а ще й до усунення швидкоосцилюючого заповнення ЦФ, що знижує рівень вимог до точності завдання початкового наближення. ЦФ у цьому випадку набирає форму

$$\rho(\vec{r}) = \|\vec{R}\|_2^2 - \vec{G}^H \cdot H^{-1} \cdot \vec{G}, \quad (3)$$

де H - матриця Грама, m -й елемент якої має такий вигляд

$$S(\tau_m - \tau_k) = \frac{\sin\{N\Delta\omega(\tau_m - \tau_k)/2\}}{N\sin\{\Delta\omega(\tau_m - \tau_k)/2\}} \cdot \exp\{j\omega_0(\tau_m - \tau_k)\}, \quad (4)$$

N - кількість частот вимірювань, $\Delta\omega$ - частотний дискрет, ω_0 - середня частота діапазону вимірювань. Отримано явний вигляд ЦФ, що дозволяє шукати значення параметрів ШДС за досить простою за структурою ЦФ, наприклад, для одношарової структури за ЦФ наступного вигляду

$$\rho(\tau_1, \tau_2) = \|\vec{R}\|_2^2 - \frac{|G(\tau_1)|^2 + |G(\tau_2)|^2 - 2\operatorname{Re}\{G^*(\tau_1) \cdot G(\tau_2) \cdot S(\tau_1 - \tau_2)\}}{1 - |S(\tau_1 - \tau_2)|^2},$$

де $G(\tau) = 1/N \cdot \sum_{n=1}^N R(\omega_n) \cdot \exp(j\omega_n \tau)$ - синтезований за \vec{R} часовий сигнал. Це дозволяє значно знизити об'єм обчислювань під час пошуку квазірозв'язку на сітці параметрів, якщо для обчислювання часового сигналу використати швидке перетворення Фур'є.

У третьому розділі роботи розглянуті шляхи підвищення ефективності визначення параметрів ШДС методом пошуку квазірозв'язку, досліджено вплив використання вагової функції під час побудови ЦФ, розглянуті рекурентна процедура розрахунку ЦФ, алгоритм пошуку квазірозв'язку на основі послідовного нарощування порядку моделі, методи регуляризації, досліджено вплив неврахування перевідбивань на похибки визначення параметрів ШДС і розглянуто алгоритм врахування малих перевідбивань. Використання вагових функцій Коші при побудові ЦФ дає змогу розширити область унімодальності ЦФ, незначно збільшуючи при цьому похибки визначення параметрів ШДС. Застосування традиційної (тихоновської) регуляризації

при розв'язуванні лінійної задачі визначення оптимальних амплітуд $\vec{r} = H^{-1}\vec{G}$ призводить в деяких випадках до розщеплення розв'язку (фізично некоректного результату). Тому під час розрахунку $H^{-1}\vec{G}$ регуляризацію слід виконувати так, щоб шукався псевдорозв'язок, нормальний відносно розв'язку лінійної задачі на одиницю меншої вимірності. Для K -ої ($K < M$) вимірності лінійної задачі її розв'язок шукається відповідно до $\vec{r}_K = (H_K + \alpha I)^{-1}(\vec{G}_K + \alpha \vec{r}_{K-1})$, де α - параметр регуляризації, I - одинична матриця. Для уникнення необхідності послідовного розв'язування M - лінійних задач в роботі запропоновано використовувати рекурентну процедуру розрахунку шуканих значень амплітуд \vec{r} і ЦФ з використанням об'єданих матриць, за якою на K -ому етапі ЦФ може бути розрахована за формулою

$$\rho_K = \rho_{K-1} - \nu_K \cdot |R_K|^2, \quad (5)$$

де ρ_{K-1} - ЦФ ($K-1$ -го етапу), $\nu_K = \det H_K / \det H_{K-1}$. При цьому $\rho_1 = \|R_1\|_2^2 - |G(\tau_1)|^2$. Під час обчислення амплітуд \vec{r} та ЦФ за такою схемою регуляризації підлягає ν_K , яку запропоновано здійснювати у вигляді, стандартному для квазіоптимальної вінеровської фільтрації: $\nu_{K,reg} = (\nu_K^2 + \alpha) / \nu_K$. Для вирішення проблеми початкового наближення запропоновано застосовувати алгоритм послідовного нарощування порядку моделі з використанням квазірозв'язку попереднього етапу як початкового наближення для поточного етапу, що зводить багатовимірну задачу вибору початкового наближення до одновимірного пошуку. Зазначений одновимірний пошук запропоновано виконувати або за часовим сигналом, який синтезовано за відхилом відповідної квазірозв'язку попереднього етапу модельної залежності КВ від вимірної, або за спеціально вилученою адитивною частиною ЦФ $\Delta_K = \nu_K \cdot |R_K|^2$. Проаналізовано вплив неврахування перевідбивань адитивною моделлю КВ з кінцевою кількістю доданків. Показано, що для $\epsilon < 16$ неврахування перевідбивань викликає незначний зсув оцінок параметрів ШДС, який в найгіршому випадку не більш 20%. Для зниження цього зсуву

запропоновано алгоритм вилучення перевідбивань із початкового виміреного сигналу.

Четвертий розділ присвячено практичним аспектам застосування МКР для визначення параметрів ШДС на реальних вимірювальних комплексах. Приведено опис вимірювально-обчислювальних комплексів РІМЧ-01 і РІМЧ-04, які були використані в роботі. Розглянуті фізична модель КВ, в яку для врахування властивостей реальної зондуючої хвилі введені поправочні коефіцієнти, попередня обробка даних вимірювань, перехід від динамічних змінних ЦФ (\bar{r} і $\bar{\tau}$) до параметрів ШДС (ϵ_m і d_m). Для дослідження впливу параметрів схеми експерименту на похибки визначення параметрів ШДС у явному вигляді отримана коваріаційна матриця оцінок за моделлю КВ (1) і проаналізована поведінка її складових. Перевірка ефективності МКР за різних умов його використання та визначення статистичних характеристик методу виконані за допомогою серії чисельних експериментів. У порівнянні з іншими методами визначення параметрів моделі (1) (методом на основі перетворення Фур'є, методом Проні і узагальненим методом жмутка функцій) МКР дозволяв отримувати оцінки з найменшою дисперсією та зсувом. Окрім оцінювання шуканих параметрів МКР давав змогу додатково оцінювати рівень адитивного шуму у експериментальних даних за значенням ЦФ, яке відповідає квазірозв'язку. Перевірка працездатності МКР, первинної обробки експериментально набутої інформації, а також переходу від динамічних змінних ЦФ до параметрів ШДС була проведена для низки зразків з відомими параметрами (з числом шарів від 1 до 3, з однорідних та неоднорідних матеріалів, включаючи пінопласти з метою перевірки граничних можливостей МКР) за даними вимірювань їх КВ на РІМЧ-01,04. Повторюваність результатів та їх статистичні характеристики при використанні МКР на установках РІМЧ-01,04 оцінювались за наборами з 15 реалізацій вимірювань для кожного із зразків. У порівнянні з аналогічними добутками використання методу оцінювання на основі перетворення Фур'є МКР мав кращі результати, особливо для "тонких" та "надтонких" структур. При використанні МКР на даних вимірювальних установках критерій Релея було перевищено у 2.7 рази.

У висновку сформульовані основні наукові та практичні результати дисертації.

В додаток винесено питання побудови інформаційної матриці Фішера та коваріаційної матриці оцінок для адитивної експоненціальної моделі, які аналізуються в роботі під час дослідження впливу шуму на результати оцінювання МКР.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод розв'язування одновимірної оберненої задачі для діелектричної структури з кусково-постійним профілем діелектричної проникності на основі пошуку квазірозв'язку з використанням спеціального вигляду адитивної експоненціальної моделі КВ структури з кінцевою кількістю доданків за даними вимірювань КВ у вільному просторі на сітці частот. Використання адитивної моделі з кінцевою кількістю доданків дозволяє спростити роботу алгоритмів оптимізації за рахунок скорочення кількості локальних екстремумів, орієнтації ЦФ повздовж координатних вісей простору параметрів і зниження вимірності задачі нелінійної оптимізації внаслідок вилучення амплітуд відбивань меж поділу з числа параметрів ЦФ за рахунок розв'язування лінійної задачі знаходження квазірозв'язку за амплітудами.

2. Показано, що ЦФ, яка побудована за даними смугових вимірювань у НВЧ діапазоні, є багатоекстремальною функцією, період швидкоосцилюючого заповнення якої визначається середньою частотою діапазону вимірювань, а її "обвідної" - шириною смуги частот вимірювань. Для розширення області унімодальності ЦФ запропоновано використовувати адитивну модель КВ з комплекснозначними амплітудами відбивань меж поділу шарів.

3. Показано, що вимірювання частотної залежності КВ на дискретній сітці частот спричиняє появу періодичності ЦФ, по якій шукається квазірозв'язок, що обмежує область однозначності визначення параметрів ШДС. Для розширення періоду ЦФ запропоновано вибрати значення початкової частоти діапазону вимірювань і частотного дискрету таким чином, щоб їх найбільший спільний дільник був якнайменший.

4. Запропоновано при обчислюванні ЦФ на сітці параметрів розраховувати її як комбінацію значень одновимірного синтезованого часового сигналу, що дозволяє значно зменшити обсяг

обчислень і час пошуку квазірозв'язку. Показано, що для оцінювання параметрів однієї межі поділу використання МКР і метода на основі перетворення Фур'є - еквівалентно.

5. Під час побудови ЦФ запропоновано застосовувати вагову функцію, яка розширює область унімодальності ЦФ, за наступною методикою: починати пошук квазірозв'язку з використанням вагової функції, що забезпечує максимальний інтервал однозначності визначання параметрів ШДС, і закінчувати з використанням вагової функції, що забезпечує мінімальну дисперсію відхилю оцінки. Отримано вигляд частотної залежності "узагальненої" дисперсії, обернення якої дозволяє одержати вагову функцію, яка забезпечує мінімум дисперсії оцінок параметрів ШДС за наявності корельованого шуму.

6. Запропоновано використання рекурентного розрахунку ЦФ, що допускає адитивне вилучення з ЦФ поточної вимірності цільової функції для підпростору на одиницю меншої вимірності і дозволяє використовувати нетрадиційний метод регуляризації на основі пошуку псевдорозв'язку, нормального відносно розв'язку лінійної задачі на одиницю меншої вимірності, що веде до отримання фізично коректних результатів.

7. Розроблено алгоритм пошуку квазірозв'язку на основі послідовного нарощування порядку моделі і використання квазірозв'язку попереднього етапу як початкового наближення для поточного етапу, що зводить багатовимірну задачу вибору початкового наближення до одновимірному пошуку і дозволяє визначати параметри ШДС за відсутністю апріорної інформації про склад структури. Для одновимірному пошуку початкового наближення по введеній вимірності моделі опрацьовані два альтернативних варіанти алгоритму: як пошук максимуму синтезованого часового сигналу по відхилю між виміреною і відповідаючою квазірозв'язку попереднього етапу модельною частотними залежностями КВ, так і по спеціально вилученій адитивній частині ЦФ, яка залежить від аналізованого місцезнаходження і передбачає розв'язування лінійної задачі пошуку оптимальних амплітуд для усіх доданків адитивної моделі.

8. Показано, що неврахування перевідбивань моделлю КВ, яка використовується, призводить до детермінованого зміщення

оцінок параметрів ШДС, які для одинарного шару зростають зі збільшенням діелектричної проникності і зменшенням товщини, а для багат шарових ШДС - за умов близькості значень електричних товщин суміжних шарів. Для вилучення впливу малих перевідбивань запропоновано проводити віднімання доданків, які відповідають перевідбиванням, із початкового виміреного сигналу.

9. Теоретично та експериментально показано, що для достатньо широкого діапазону рівня шуму дисперсія оцінок місцезнаходження меж поділу шарів ШДС прямо пропорційна дисперсії адитивного шуму, обернено пропорційна кількості частот вимірювань і кубу ширини смуги частот вимірювань, а від середньої частоти діапазону вимірювань має осцилюючу залежність, мінімуми якої досягаються у випадку ортогональності доданків адитивної моделі на середній частоті.

10. Запропонована методика вибору вірного знаку парціальних коефіцієнтів відбиття меж поділу шарів ШДС, що заснована на використанні спеціально побудованої допоміжної величини, наближено рівній сумі оцінок відбивань від усіх меж поділу, яка при вірному оцінюванні повинна наблизитись до нуля.

11. Експериментально на тестових зразках з відомими параметрами підтверджена можливість використання МКР для визначення геометричних товщин і відносних діелектричних проникностей матеріалів шарів багат шарових діелектричних структур, в тому числі і тих, що мають у своєму складі "тонкі" або "надтонкі" шари, а також обґрунтованість обраної методики попередньої обробки вимічених даних. Під час оцінювання параметрів конкретних зразків на конкретних вимірювальних комплексах критерій Релея було перевищено у 2.7 рази.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Применение концепции квазирешения для определения параметров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. I // Дефектоскопия. - 1995. - № 12. - С. 41-50.
2. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О., Киричко А.И. Применение концепции квазирешения для определения пара-

метров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. II // Дефектоскопия. - 1995. - № 12. - С. 51-63.

3. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Сравнительный анализ информационных возможностей методов многочастотного радиоволнового контроля слоистых диэлектрических структур с использованием квазиразрешения // Дефектоскопия. - 1996. - № 2. - С. 78-86.

4. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Применение концепции квазиразрешения для определения параметров слоистых диэлектрических структур по данным измерений характеристик отражения на многих частотах. III // Дефектоскопия. - 1996. - № 6. - С. 70-81.

5. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Применение концепции квазиразрешения для оценки параметров многослойных диэлектрических структур по характеристике отражения, измеренной на сетке дискретных частот // Дефектоскопия. - 1996. - № 9. - С. 47-60.

6. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. О реализации метода квазиразрешений при определении параметров слоев диэлектрических слоистых структур. I // Дефектоскопия. - 1996. - № 9. - С. 61-72.

7. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Определение параметров слоистых диэлектрических структур методами минимизации целевой функции // Матер. 3-й Крымской конфер. "СВЧ-техника и спутниковый прием". - Севастополь, 1993, Т.2, С.176-180.

8. Andreev M.V., Borulko V.F., Drobakhin O.O. The solution of the inverse problem for multilayered dielectric structures // Proc. of Int. Symp. "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves". - Kharkov, 1994, V. 1. - pp. 42-45.

9. Andreev M.V., Borulko V.F., Drobakhin O.O. Inversion of one-dimensional reflecting data of multilayered structures using quasisolutions // Proc. of Int. Conf. "Mathematical Methods in Electromagnetic Theory". - Kharkov, 1994. - p. 7-10.

10. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. О неразрушающем контроле многочастотными методами слоистых диэлектрических структур путем поиска квазиразрешений // Тез. докл. I Укр. нац. конф. "Техническая диагностика и неразрушающий контроль в Украине". - Днепрпетровск: КБ "Южное", 1994. - С.

77-78.

11. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. Применение метода минимизации целевых функций для контроля параметров радиолокационных покрытий // Тез. докл. Междун. науч.-техн. конф. "Современная радиолокация - 94". - Киев, 1994. - С. 77-78.

12. Андреев М.В., Дробахин О.О., Кремнев М.М., Лимаренко С.П. Применение цифрового спектрального анализа в радиофизических измерениях многочастотными методами // В трудах Второй Международ. науч.-техн. конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Том 3: Измерения в радиоэлектронике. - Новосибирск, 1994. - С. 99-101.

13. Andreev M.V., Borulko V.F., Drobakhin O.O. One-dimensional inverse problem solution for multilayered dielectric structures using least square spectral estimation method // Proc. of the 15th URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory. - St.Petersburg, Russia, 1995. - pp.148-150.

14. Drobakhin O.O., Borulko V.F., Karlov V.A., Andreev M.V., Saltykov D.Yu. Multifrequency methods and apparatus for transmission line and dielectric material testing in microwave range // Proc. of 5th Int. Symp. on Recent Advances in Microwave Technology. - Kiev, Ukraine, 1995, Vol. 2. - pp.570-573.

15. Андреев М.В., Борулько В.Ф., Дробахин О.О. О спектральном оценивании с сегментированием входных данных // Тез. докл. Междун. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации". - Туапсе: ХТУРЭ, 1995. - С. 36.

16. Андреев М.В. Контроль параметров диэлектрических антенных укрытий по частотной зависимости коэффициента отражения методом поиска квазиразрешения // Тез. докл. Междун. конф. "Теория и техника антенн". - Харьков: ХТУРЭ, 1995. - С. 80.

17. Drobakhin O.O., Borulko V.F., Andreev M.V., Belichenko Ya.V., Klimenko A.D. Using spectral estimation methods for external problems of microwave measurements // Digest of Conference on Precision Electromagnetic Measurements. - Braunschweig, Germany, 1996. - p. 204-205.

18. Дробахин О.О., Салтыков Д.Ю., Борулько В.Ф., Карлов В.А., Андреев М.В., Беличенко Я.В., Клименко А.Д., Короткая В.Г. Использование многочастотных методов измерений для оценки качества СВЧ трактов спутниковых систем связи // В трудах 2-й Международной конференции "Спутниковая связь". - М.: МЦНТИ, 1996, Т. 2. - С. 96-107.

Андреев М.В. Определение параметров слоистых диэлектрических структур многочастотными методами на основе поиска квазиразрешения.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Днепропетровский госуниверситет, Днепропетровск, 1997.

Разработан метод решения одномерной обратной задачи для диэлектрической структуры с кусочно-постоянным профилем диэлектрической проницаемости на основе поиска квазиразрешения по данным измерений коэффициента отражения на сетке частот в свободном пространстве с использованием специального вида аддитивной экспоненциальной модели коэффициента отражения с конечным числом слагаемых. Исследованы особенности поиска квазиразрешения по данным полосовых измерений коэффициента отражения в СВЧ диапазоне и пути расширения области однозначности определения параметров слоистых структур. Предложен устойчивый алгоритм решения указанной обратной задачи с использованием нетрадиционного метода регуляризации. Экспериментально подтверждена возможность использования разработанного метода для определения параметров диэлектрических структур, содержащих "тонкие" и "сверхтонкие" слои.

Andreev M.V. Layered dielectric structure parameter determination by multifrequency methods using quasisolution.

Thesis for obtaining a scientific degree of "Candidate of Physico-Mathematical Sciences" on speciality 01.04.03 - Radiophysics, Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, 1997.

Methods of one-dimensional inverse problem solution for multilayered dielectric structure with use of quasisolution are developed. The approach is based on multifrequency reflection coefficient measurements in free space and additive exponential model of reflection coefficient with the finite number of addends. Particularities of quasisolution for K-band data and techniques for extension of region of structure parameters determination uniqueness are considered. Stable algorithm of this inverse problem solution using non-traditional regularize technique are proposed. The method capabilities to estimate parameters of structure with "thin" and "superthin" layers are confirmed experimentally.

Ключові слова: шарувата діелектрична структура, коефіцієнт відбиття, багаточастотні вимірювання, обернені задачі, квазірозв'язок, цільова функція, мінімізація, алгоритм, товщина шарів, діелектрична проникність шарів, зондуюча хвиля.

тип. ДГУ зак. 641-100.

21004

AB 37.334