

ВИЯВЛЕННЯ МЕЖІ НЕОДНОРІДНОСТІ У ДІЕЛЕКТРИЧНІЙ СТРУКТУРІ РАДІОХВИЛЬОВИМ МЕТОДОМ

В. Р. Джала

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

E-mail: vjoe@ipm.lviv.ua

Запропоновано та експериментально апробовано модель комплексного коефіцієнта відбивання від діелектричної структури, що враховує скінченність розмірів антенної системи. Застосування моделі під час сканування діелектричного шару та розв'язання оберненої задачі дало можливість виявити межу розшарування у матеріалі та підвищити достовірність неруйнівного контролю локальних дефектів.

Ключові слова: радіохвильовий надвисокочастотний неруйнівний контроль, рупорна антена, сканування, коефіцієнт відбивання, обернена задача, товщина діелектричного шару, розшарування, локальний дефект.

IDENTIFICATION OF AN EDGE OF HETEROGENEITY IN A DIELECTRIC STRUCTURE BY MICROWAVE NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUE

V. R. Dzhala

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine

It is experimentally shown that a one-dimensional model of a complex reflection coefficient, based on the approach of a plane wave has can not be used for solving the inverse problems of nondestructive testing of the plane-layered dielectric structures with local heterogeneities. The model of the complex reflection coefficient for a dielectric structure is proposed and results of its experimental validation are given. The model assumes that the antenna aperture has a finite size and it is based on the concept of electric field distribution in the antenna's aperture. Application of the model to both scanning a dielectric slab and solving an inverse problem allows us to identify an edge of heterogeneity in the slab material and to increase the confidence of the nondestructive testing of local defects.

Keywords: microwave nondestructive testing, horn antenna, scanning, reflection coefficient, inverse problem, thickness of dielectric layer, delamination, local defect.

Діелектричні і композитні матеріали широко використовують як несучі конструкції і як захисні покриття. Під час виготовлення та експлуатації цих виробів можуть виникати дефекти у вигляді розшарувань, зміни товщин окремих шарів тощо. Для контролю якості такого класу виробів використовують, зокрема, радіохвильовий метод неруйнівного контролю (НК), оскільки він є чутливим до геометричних та електрофізичних параметрів об'єкта контролю (ОК) [1]. Розв'язання обернених задач (ОЗ) діагностики дає можливість кількісно оцінити параметри складних структур у широких межах зміни їх параметрів, зокрема, визначати геометричні та електрофізичні параметри окремих шарів [2–4].

Для побудови моделі взаємодії зондувального сигналу з середовищем використовували наближення плоскої хвилі, при цьому вважали, що ОК складається з нескінченних шарів з плоскопаралельними межами розділу [2, 5]. Для неоднорідних структур і структур з локальними дефектами така умова не задовольняється. Роздільна здатність за поздовжнього сканування структури залежатиме від розміру апертури антени. Для підвищення роздільної здатності можна зменшити розмір зонда, але це входить у протиріччя з умовою забезпечення плоского фронту хвилі. Інший шлях – збільшення роздільної здатності внаслідок обробки отриманої під час сканування інформації.

© В. Р. Джала, 2016

Нижче показано, що одновимірна модель комплексного коефіцієнта відбивання (ККВ) має обмеження щодо застосування для вирішення ОЗ діагностики структур з локальними неоднорідностями. Запропоновано модель ККВ неоднорідної шаруватої структури з урахуванням властивостей апертури антени і експериментально показано можливість підвищення роздільної здатності за позовжнього сканування діелектричної пластини з розшаруванням змінного профілю.

Математична модель сканування плоскошарових діелектричних структур з локальними неоднорідностями. Для отримання зображення об'єкта під час НК плоскошарових структур з локальними неоднорідностями необхідно вимірювати в різних точках площини зразка, тобто сканувати ОК. Сканувати ОК можна різними способами, зокрема механічним поворотом антенної системи і зміною кута нахилу променя у двох площинах, електронним керуванням променя за допомогою фазованої антенної ґратки або переміщенням антени у площині зразка (синтезована апертура) [6, 7]. Останній спосіб найбільше підходить для сканування плоскошарових структур за допомогою рупорної приймально-передавальної антени. У цьому випадку зондувальне поле падає перпендикулярно до площини зразка. Задача антенної системи полягає у формуванні як можна вужчої апаратної функції (променя) в напрямку ОК.

Після встановлення антенної системи у задане положення вимірюють частотну залежність коефіцієнта відбивання, розв'язують ОЗ і визначають параметри структури ОК у цій точці. Сукупність великої кількості таких вимірювань дає можливість побудувати зображення об'єкта, що відповідає розподілу по площині параметрів структури.

Проблемою для отримання зображення об'єкта є обмежена роздільна здатність у площині сканування через скінченні розміри апертури антени. Результат вимірювання завжди є усередненням за деякою областю навколо осі апертури антени [7]. Застосування одновимірної моделі ККВ в області, де параметри середовища неоднорідні, призведе до помилкової інтерпретації даних, результат розв'язання ОЗ буде непередбачуваним. Тому слід побудувати модель вимірюваного сигналу, яка б враховувала властивості антенної системи. Числовою характеристикою антенної системи є апаратна функція, вона дорівнює відгуку системи на одиничний розсіювач залежно від його положення відносно оптичної осі антенної системи. Підвищити роздільну здатність можна шляхом вирішення ОЗ, застосування методів надрозділення [8–11], однак це потребує додаткових обчислювальних затрат.

Модель вимірюваного сигналу для однорідної структури можна записати у вигляді (одновимірна модель) [4]

$$D = D(V_S(\mathbf{p})), \quad (1)$$

де $V_S(\mathbf{p})$ – ККВ, що залежить від вектора параметрів структури \mathbf{p} . Для неоднорідної структури вектор параметрів залежатиме від координати $\mathbf{p} = \mathbf{p}(x, y)$. Очевидно, ККВ структури в області неоднорідності відрізнятиметься від ККВ за одновимірною моделлю.

Розгляд довільних неоднорідностей у шаруватих структурах є надто складним, тому вдамося до певних гіпотез. Будемо вважати, що зондувальна хвиля падає на межі розділу шарів перпендикулярно в кожній точці, окремі шари є однорідними та ізотропними, а їх товщини змінюються сходинками. Ефектами розсіювання на ребрах і бічних гранях структури нехтуватимемо. За такого спрощення запишемо “тривимірну” модель ККВ у вигляді

$$V_{S3D}(x, y) = \iint_A A(x - x', y - y') \cdot V_S(\mathbf{p}(x', y')) dx' dy', \quad (2)$$

де $A(x, y)$ – апаратна функція антенної системи; (x, y) – положення осі антени; V_S – ККВ, розрахований за “одновимірною” моделлю в точці (x', y') ; A – область, у якій апаратна функція відмінна від нуля. Апаратна функція антенної системи повинна задовольняти умову нормування

$$\iint_A A(x', y') dx' dy = 1. \quad (3)$$

Вимірний сигнал для неоднорідної структури тривимірної моделі можна записати у вигляді

$$D_{3D}(x, y) = D(V_{S3D}(x, y)). \quad (4)$$

Для однорідної структури формула (4) перетворюється у (1). Формула (2) є згортокою, дія апаратної функції призводить до фільтрації низьких просторових частот [6, 8]. ОЗ діагностування неоднорідної структури полягає у знаходженні такого розподілу вектора параметрів системи $\mathbf{p}^{**}(x, y)$, який би задовольняв умову

$$\mathbf{p}^{**}(x, y) = \inf_P \sum_{x, y} (D_{ex}(x, y) - D_{3D}(x, y))^2, \quad (5)$$

тобто, який би мінімізував похибку між експериментально вимірними результатами і моделлю в області сканування ОК. Очевидно, не існує точного розв’язку ОЗ, особливо за наявності шумів, методичних похибок, а можна отримати лише оптимальний наближений розв’язок [12].

Подібні задачі виникають під час обробки розфокусованих зображень, у системах радіобачення тощо [8, 9], завданням є компенсація розмиття зображення, що виникає внаслідок скінченної роздільної здатності системи. Методи розв’язування таких задач полягають у мінімізації цільового функціонала, наприклад [10, 11]. Однак тут ситуація ускладнюється тим, що шуканий параметр є вектором і не є величиною, яка безпосередньо вимірюється, тому не вдається напряму застосувати відомі методи обробки зображень.

Побудова апаратної функції антенної системи. За числового розв’язування обернених задач радіохвильового надвисокочастотного (НВЧ) НК необхідне порівняння результатів обчислень з натурними експериментами. Прямі задачі зондування плоскошарових діелектричних структур найчастіше розв’язуються в наближенні плоских хвиль [2–5]. Тому важливою для практики є побудова антен з квазіплоским розподілом електромагнітної хвилі в апертурі. Для цього пропонуємо використати рупорні пірамідальні антени (РА).

РА є найпростішими антенами НВЧ діапазону радіохвиль, які можуть формувати діаграму напрямленості (ДН) до 10...20 град. Перевагами рупорних антен є можливість зміни робочої частоти, що обмежується лише збудженням вищих типів хвиль у хвилеводі, високий коефіцієнт корисної дії, відносна простота виготовлення. Недоліки РА такі: великі розміри та труднощі під час регулювання амплітудного і фазового розподілу поля в розкритті [6, 7, 13]. Випромінювальний розкритт – це деякий отвір (апертура) в провідній поверхні, через який здійснюється випромінювання. У міліметровому діапазоні довжин хвиль і за відносно малих віддалей від апертури до ОК вимірювання параметрів антен є утруднене через взаємодію між зондом і апертурою досліджуваної антени та скінченні розміри зонда. Тому для побудови апаратної функції антенної системи скористаємося уявленнями про структуру поля в апертурі.

Для визначення поля в розкритті рупора зазвичай використовують наближення геометричної оптики або числові методи [7, 13, 14]. За збудження поля хвилеводом у рупорі струм має ті самі складові по ортогональним осям, що у хвилево-

ді, однак картина поля дещо zdeформована. Фронт хвилі в рупорі є циліндричною поверхнею з віссю, розміщеною на лінії перетину бокових стінок хвилеводу, що призводить до симетричних фазових похибок у розкритті рупора. Амплітудний розподіл по поверхні фронту виявляється таким, як і в поперечному січнні хвилеводу.

Вважатимемо, що фазові похибки не впливають на результат вимірювання, тобто хвиля у розкритті рупорної антени є плоскою. Отже, апаратна функція антенної системи має бути скалярною. Експериментально показано (рис. 1), що на результат вимірювання ККВ впливають лише об'єкти, які знаходяться на проекції апертури антени. Тому апаратна функція буде відмінною від нуля лише в області, яка збігається з апертурою антени. Амплітудний розподіл апаратної функції виберемо як у напруженості електричного поля у розкритті пірамідальної антени. У цьому випадку хвилевід є квадратним, в силу симетрії розподіл поля відповідає типу хвилі H_{11} :

$$\dot{E}_z = \dot{E}_0 \sin\left(\frac{\pi}{a'}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{b'}y\right), \quad (6)$$

де $a' = b'$ – розміри перерізу хвилеводу. Розкритв антени квадратної форми, повернутий на 45° відносно осей XOY . Вигляд апаратної функції антенної системи показано на рис. 2.

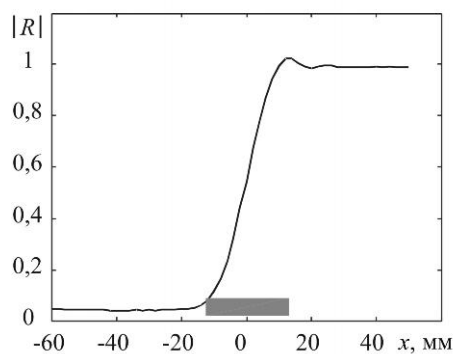


Рис. 1.

Рис. 1. Залежність модуля ККВ від положення краю металевого екрану відносно осі апертури антени.

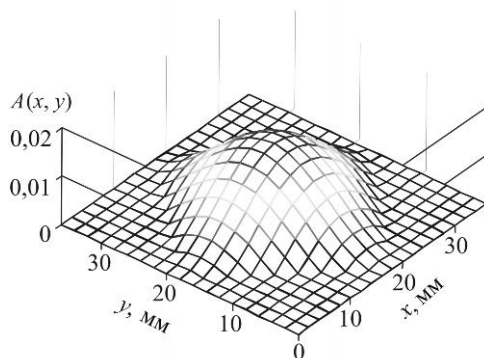


Рис. 2.

Рис. 2. Апаратна функція антенної системи $A(x, y)$.

Сканування структур з локальними неоднорідностями і числове моделювання. Експериментували на автоматизованому стенді НВЧ діагностики у смузі частот 58...76 ГГц [4, 15] (рис. 3). Стенд побудовано за принципом інтерферометра на базі подвійного Т-моста. Вимірний сигнал мостової схеми описують співвідношенням

$$D(\dot{V}, \dot{V}_c(\alpha, \varphi), \dot{k}_0, \dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3) = \frac{U_{ref}}{U_{inc}} = \left| \dot{k}_0 + \dot{k}_1 \cdot \frac{V - V_c}{(1 - \dot{k}_3 \cdot V) \cdot (1 - \dot{k}_3 \cdot V_c) - \dot{k}_2 \cdot V \cdot V_c} \right|^2, \quad (7)$$

де $k_0(f), \dots, k_3(f)$ – комплексні коефіцієнти, що описують властивості схеми. Зв'язок між вимірним ККВ $V(f)$ та ККВ плоскошарового середовища $V_S(f)$ можна записати у вигляді

$$V = S_1 + \frac{S_2 V_S}{1 - S_3 V_S}, \quad (8)$$

де S_1, \dots, S_3 – комплексні коефіцієнти, які визначають з матриці розсіювання антени. ККВ однорідного плоскошаруватого середовища залежить від товщин шарів і електрофізичних параметрів матеріалів:

$$V_S = V_S(f, h_1, \dots, h_{M-1}, \epsilon_1, \dots, \epsilon_M, \text{tg}\delta_1, \dots, \text{tg}\delta_M). \quad (9)$$

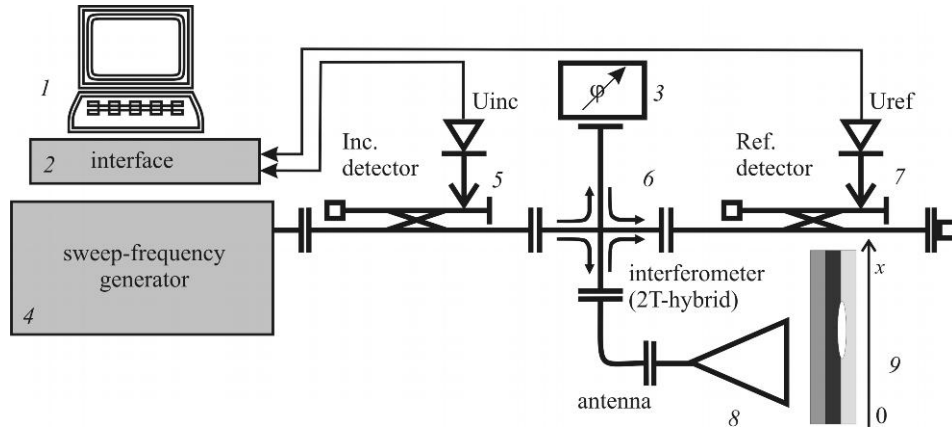


Рис. 3. Функціональна схема автоматизованого стенду НВЧ діагностики:

- 1 – персональний комп'ютер; 2 – інтерфейсний блок; 3 – каліброване навантаження;
4 – генератор коливальної частоти; 5, 7 – детектори падаючого і відбитого поля;
6 – подвійний Т-міст; 8 – антена; 9 – плоскошарова структура з механізмом переміщення.

Параметри мостової схеми та антени визначають на етапі калібрування і є відомими. Отже, можна записати узагальнену модель вихідного сигналу мостової схеми для однорідної шаруватої структури так:

$$D_{th} = D_{th}(f, V_S(\mathbf{p})), \quad (10)$$

де \mathbf{p} – вектор невідомих (шуканих) параметрів шаруватого середовища; f – частота. ОЗ діагностики однорідної діелектричної структури розв'язується методом мінімізації функціонала

$$\mathbf{p}^* = \inf_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} \sum_{i=1}^{N_f} |D_{ex}(f_i) - D_{th}(f_i, V_S(\mathbf{p}))|^2, \quad (11)$$

де N_f – кількість частотних відліків.

Для неоднорідної структури розв'язування ОЗ можна звести до мінімізації нелінійного функціонала, що залежить від координат

$$\mathbf{p}^{**}(x, y) =$$

$$= \inf_{\mathbf{p} \in \mathbf{P}} \sum_{x,y,i} \left(D_{ex}(x, y, f_i) - D_{th} \left(f_i, \iint_A A(x-x', y-y') \cdot V_S(\mathbf{p}(x', y'), f_i) dx' dy' \right) \right)^2, \quad (12)$$

де $\mathbf{p}^{**}(x, y)$ – є шуканий розподіл вектора невідомих параметрів структури в усій області спостереження, $D_{ex}(x, y, f)$ – експериментальні результати, визначені в усіх точках рівномірної сітки області спостереження (x_i, y_i) . Загалом розв'язування такої задачі є надто складним, оскільки кількість невідомих параметрів є розмірність вектора помножена на кількість точок спостереження. Тому пропонуємо розглянути часткові випадки, коли форма неоднорідності відома, а також використаємо апріорну інформацію про розподіл вектора $\mathbf{p}^*(x, y)$ з розв'язку одновимірної ОЗ (11).

Розглянемо випадок одновимірного сканування вздовж осі Ox . Нехай параметри структури змінюються стрибкоподібно в одній точці. Цей випадок моделює межу локального розшарування в матеріалі.

Пропонуємо такий алгоритм розв'язання ОЗ:

1. Скануємо зразок і вимірюємо ККВ.
2. Для кожної точки спостереження розв'язуємо одновимірну ОЗ (11), визначаємо розподіл вектора шуканих параметрів структури $\mathbf{p}^*(x)$.
3. На ділянці спостереження виділяємо область (x_{\min}, x_{\max}) , в якій параметри структури значно змінюються з координатами.
4. На краях виділеної області параметри структури фіксуємо, і всередині області розв'язуємо ОЗ у вигляді (12), де $\mathbf{p}^{**}(x)$ є кусково-постійна функція координати. Задачу розв'язуємо методом глобальної мінімізації функціонала, за початкове наближення беремо $\mathbf{p}^*(x)$ на краях виділеної області.

Запропонований алгоритм експериментально перевірили. Схема експерименту показана на рис. 4. Досліджуваний зразок поміщено на платформу, яка може рухатись відносно апертури антени у площині XOY . Для фізичного моделювання локальних неоднорідностей у діелектричному матеріалі виготовили спеціальні зразки. У пластині з оргскла завтовшки 8 мм фрезою зробили вирізи прямокутної форми $5,5 \times 6,5$ см і глибиною близько 0,7 та 1 мм. Електрофізичні параметри матеріалу пластини такі: діелектрична проникність $\epsilon = 2,62$; тангенс кута втрат $\text{tg}\delta = 6,71 \cdot 10^{-3}$. На рис. 5 показано результат двовимірного сканування області з неоднорідністю з визначенням положення і товщини.

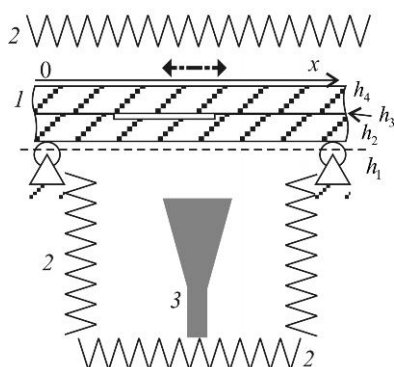


Рис. 4.

Рис. 4. Сканування структури з локальною неоднорідністю.
Схема експерименту: 1 – багатошарова структура; 2 – поглинач; 3 – антена.

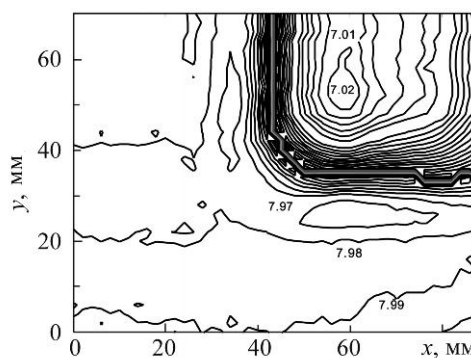


Рис. 5.

Рис. 5. Виміряна за результатами розв'язку ОЗ залежність товщини пластини від координат.
Крок сканування 2 мм.

Розглянемо результат одновимірного сканування діелектричного шару змінної товщини. Неоднорідність виконана у вигляді сходинки $\sim 0,7$ мм. На рис. 6а показано розв'язок ОЗ (товщина пластини) для одновимірної моделі (суцільна крива) і за виразом (12) (пунктирна). Також показано (рис. 6б) середньоквадратичне відхилення результатів моделювання і експерименту залежно від координати осі антени. Як бачимо, в області, в якій товщина пластини стала чи мало змінюється, профіль за розв'язком ОЗ відповідає дійсній товщині пластини, що підтверджено контрольними вимірюваннями за допомогою мікрометра (похибка визначення товщини не перевищує 0,02 мм). В областях, де проекція апертури антени перекривається лінією сходинки визначення профілю відбувається з похибкою, вона тим більша, що ближча вісь апертури антени до сходинки і є максимальною в точці наближеній до стрибкоподібної зміни товщини. З рис. 6б видно,

що в околі неоднорідності зростає середньоквадратичне відхилення експериментальних результатів і моделі, а отже, похибка моделювання може слугувати сигнальною функцією того, що у цій області є неоднорідність і отримані за розв'язком ОЗ параметри структури відрізняються від дійсних. Введення тривимірної моделі значно зменшує похибку моделювання у зоні неоднорідності, а профіль пластини відновлений за її допомогою відповідає реальному.

Наступний експеримент проведено для відновлення профілю діелектричної пластини з локальним розшаруванням (рис. 7).

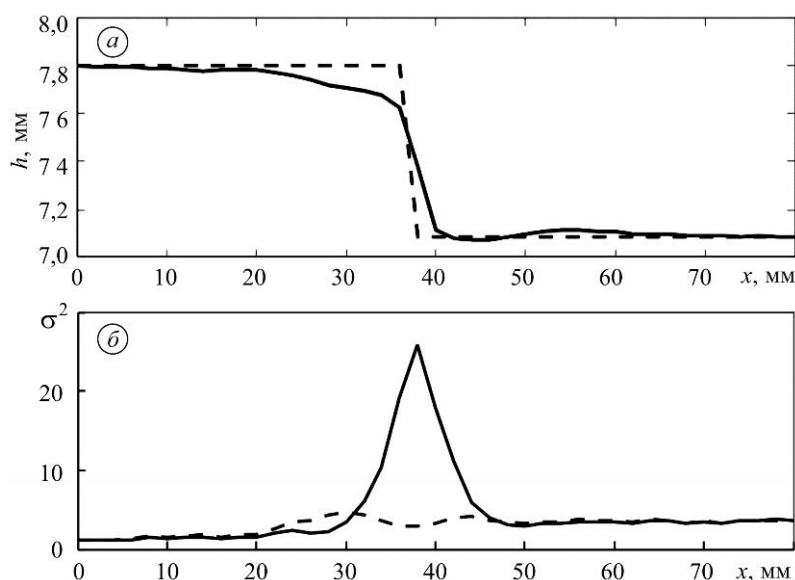


Рис. 6. Профіль діелектричної пластини (а) та середньоквадратичне відхилення моделі від експерименту (б) для одновимірної моделі $D_{th}(V_s(x))$ (суцільна крива) та тривимірної $D_{th}(V_{s3D}(x))$ (пунктирна).

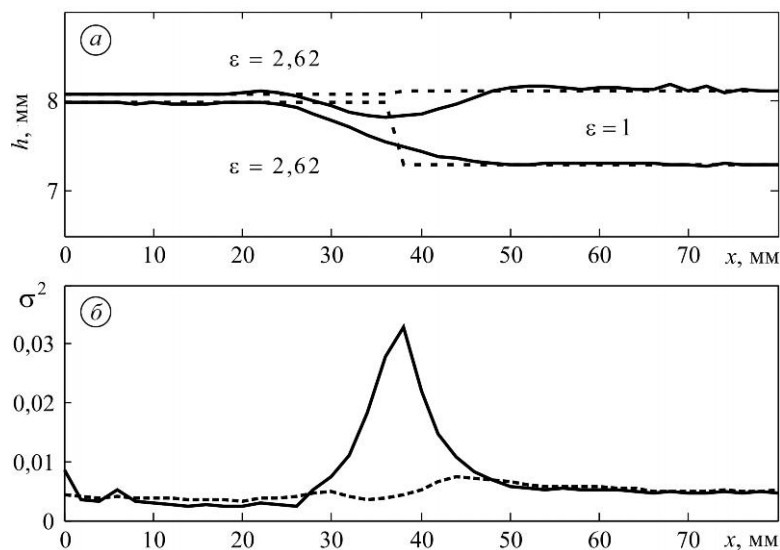


Рис. 7. Профіль розшарування у діелектричному шарі (а) та середньоквадратичне відхилення моделі від експерименту (б) для одновимірної моделі $D_{th}(V_s(x))$ (суцільна крива) та тривимірної $D_{th}(V_{s3D}(x))$ (пунктирна).

Розшарування моделювали за допомогою двох суміщених пластин з оргскла, одна з яких має виріз глибиною 0,7 мм. Діелектричну пластину з розшаруванням описували моделлю 4-шарового середовища. На рис. 7а показано профіль розшарування, отриманий зі застосуванням одновимірної (суцільна крива) та тривимірної моделі ККВ (пунктирна). З рисунка видно, що в околі неоднорідності відновлення товщини за допомогою одновимірної моделі відбувається з певною похибкою. Цей окіл приблизно відповідає характерному розміру апертури антени 35 мм. Тривимірна модель краще описує взаємодію зондувального поля з середовищем в околі неоднорідності.

ВИСНОВКИ

Показано, що одновимірна модель ККВ має обмеження щодо застосування для вирішення ОЗ діагностики структур з локальними неоднорідностями. Запропонована та експериментально випробувана тривимірна модель ККВ, яка враховує скінченність розмірів антенної системи, дозволяє підвищити достовірність та роздільну здатність радіохвильового методу під час НК діелектричних структур з локальними неоднорідностями.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.*
2. *Колодій Б. І., Лящук О. Б. Математичні моделі, методи та алгоритми радіохвильової діагностики багат шарових діелектриків // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – № 5. – С. 49–57.*
3. *Лящук О. Б., Назарчук З. Т., Джала В. Р. Методи і апаратура радіохвильової НВЧ діагностики і неруйнівного контролю багат шарових діелектричних матеріалів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 1999. – Вип. 5. – С. 77–80.*
4. *Джала В. Р., Капко Л. І. Радіохвильове зондування шаруватих діелектричних структур // Вибір і обробка інформації. – 2008. – № 28 (104). – С. 5–10.*
5. *Wait J. Electromagnetic waves in stratified media. – Oxford: Pergamon Press, 1970. – P. 608.*
6. *Пирогов Ю. А. Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне длин волн // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2003. – XLVI, № 89. – С. 660–670.*
7. *Радиотехнические системы / Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.*
8. *Superresolution and coherent phenomena in multisensor systems of millimeter-wave radio imaging / Y. A. Pirogov, V. V. Gladun, I. V. Shlemin, S. P. Chzhen, D. A. Tischenko, A. L. Timanovskiy, A. V. Lebedev // Proc. SPIE. – 2003. – 5077. – P. 110–120.*
9. *Van Kempen G. M., van Vliet L. J. Background estimation in nonlinear image restoration // J. of the Optical Society of America A: Optics, Image Science & Vision. – 2000. – 17, № 3. – P. 425–433.*
10. *Lucy L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions // The astronomical journal. – 1974. – 79, № 6. – P. 745–754.*
11. *Lantèri H., Soummer R. Comparison between ISRA and RLA algorithms. Use of a Wiener Filter based stopping criterion // Astronomy astrophysics supplement series. – 1999. – 140. – P. 235–246.*
12. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 286 с.*
13. *Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование линзовых, сканирующих широкодиапазонных антенн и фридерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.*
14. *Bin Sediq A. S., Qaddoumi N. Near-field microwave image formation of defective composites utilizing open-ended waveguides with arbitrary cross sections // Composite Structures. – 2005. – 71. – P. 343–348.*
15. *Джала В. Р., Капко Л. І. Вимірювання комплексного коефіцієнта відбивання у радіохвильовому діапазоні довжин хвиль // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Вип. 11: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів: ФМІ НАНУ, 2006. – С. 153–157.*

Одержано 03.09.2015