

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ У ЗАСТОСУВАННЯХ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

канд. техн. наук О.О. Огір, ІПМЕ ім Г.С. Пухова, м. Київ

Abstract. The investigation of mathematical models of ultrasonic signals used in acoustic imaging systems forming the internal structure of controlled materials and media objects energy industry. Such models make it possible to take into account all effects in wave processes: radiation and reflection of waves, phenomena of interference and diffraction of waves, wave type transformations during reflection and the appearance of damped waves at the interfaces of opaque media.

Відомо, що хвильове рівняння в твердому тілі з граничними умовами (поверхні дефектів, границі об'єктів) дає множину рішень для хвиль, що розповсюджуються в об'єкті контролю (ОК), по границях, відбитих повторно хвиль. Крім цього, з'являється рішення для хвиль з наростаючою та спадаючою амплітудою. Рішення задачі в аналітичному вигляді передбачає вибір фізичних хвильових процесів, деякий "штучний відбір". Часто при завданні множинних граничних умов, хвильова задача виявляється настільки складною, що аналітичне рішення не може бути одержане. Накопичений досвід в точному вирішенні хвильових акустичних задач практично неможливо використати для наших цілей, оскільки в самому загальному випадку не доведено існування і єдність рішення оберненої задачі.

Існує розділ математики – теорія розсіяння, в якій вирішується задача одержання інформації про неоднорідності середовища по відгукам на впливи різноманітної природи – оптичні, радіаційні, електромагнітні хвилі, УЗ-хвилі. Особливістю даного підходу є умова, що розмір області спостереження (реєстрації) в багато разів перевищує розмір неоднорідності середовища. Вводиться оператор розсіяння, який зв'яже хвильові потоки, що поступають в область спостереження, і хвильові потоки, що виходять з неї. В операторі розсіяння знаходиться вся інформація про внутрішню структуру середовища. Звичайно, неоднорідність представляють у вигляді розподілу щільності середовища $\rho(x, y, z)$ або швидкості звуку $C(x, y, z)$ в просторі. Теорія розсіяння вивчає асимптотичні рішення хвильового рівняння. Методами теорії розсіяння знаходять деякі опосередковані параметри неоднорідності.

Існуюча неоднозначність інтерпретації ехосигналів від різноманітних джерел відбитої хвилі пов'язана з багатою динамікою хвильового рівняння для твердих тіл з декількома границями, або ж з криволінійними пограничними площинами. Доводиться йти на різноманітні спрощення теоретичної моделі для того, щоб з'явилась можливість рішення оберненої

задачі. В УЗ-апаратурі, призначеної для візуалізації дефектів, використовуються багатоселементні перетворювачі. Параметри УЗ-поля кожного перетворювача обираються такими, щоб захвачувалась область реконструкції зображення або більша її частина. В сучасних системах використовують системи сканування досліджуваної зони – вузько сфокусованим променем. Використовуємо також припущення про те, що дефекти розміщені в дальній зоні УЗ-поля перетворювача. Це означає, що фронт УЗ-хвилі, що падає на елементарний відбивач – сферичний, і фронт відбитих хвиль, що реєструються прийнятною антеною, також сферичний. Ця умова забезпечує розподіл інтегралів по фронті та по дальності. По традиції назвемо $f(I)$ функцією відгуку точкового джерела (ФВТД). Визначимо математичний опис відбивачів. Існують два основних підходи. В першому випадку вважають, що акустичні характеристики об'єкту плавно змінюються в просторі. Виділяють розподіл швидкості звуку, затухання та коефіцієнту відбиття по об'єкту. Далі вибраний розподіл реконструюють в зображення по даних прозвучування. В іншому випадку вважають, що об'єкт контролю представляє собою набір різких границь. Акустичні характеристики об'єкта (швидкість звуку, затухання) в зоні озвучення дефекту однорідні, їх відхилення в цих зонах незначні і їх можна не брати до уваги. Прийmemo модель різких границь в якості основної для побудови алгоритмів реконструкції зображень. Геометрично структуру об'єкту контролю (ОК) будемо представляти у вигляді просторової функції границь $I(r)$, яка дорівнює одиниці на границях ОК і на поверхностях дефекту, і дорівнює 0 в решті об'єму. Різні частини поверхні дефекту можуть по різному відбивати УЗ хвилі, тому необхідно ввести просторову функцію $K_{\text{відб}}(r)$, яка характеризує коефіцієнт відбиття. Коефіцієнт відбиття залежить від розсіюючих властивостей поверхні дефекту, від характеристики її шерохватості. Величина $K_{\text{відб}}(r)$ залежить також від напрямку падіння УЗ хвиль. Функцію об'єкту контролю запишемо у вигляді добутку функції границь і коефіцієнта відбиття

$$O(r) = I(r) \cdot K_{\text{відб}}(r) \quad (1)$$

Інформація про об'єкт контролю $O(r)$ міститься в ехосигналах. Математична задача одержання акустичного зображення зводиться до реконструкції функції границь дефекту по реєстрованому набору ехосигналів, одержаних різними способами.

Важливо відмітити, що з допомогою УЗ сканерів відтворення $I(r)$ здійснюється умовно. Завжди мається вірогідність викривлень, пов'язаних з коефіцієнтом відбиття. Наприклад, якщо є деяка границя в $I(r)$, але на ній коефіцієнт відбиття з якихось причин дорівнює нулю, то УЗ сканер в принципі не виявляє цю границю. Одержимо аналітичний вираз для

ехосигналів від об'єкту з дефектами. Позначимо $L = |R_t| + |R_l|$, сумарну довжину пробігу хвиль від випромінювача до відбивача і назад, а також $L = C \cdot t$ – довжину пробігу хвиль, відповідну затримці сигналу, C – швидкість звуку. Ехосигнал $F(L)$ буде виражатись інтегралом по об'єму

$$F(L) = \int f(L - l) \cdot U(r) \cdot O(r). \quad (2)$$

Функція об'єкта контролю $O(r)$ в формулі (2) перетворює інтеграл по об'єму в інтеграл по поверхні, оскільки $O(r)$ дорівнює коефіцієнту відбиття на поверхні і дорівнює 0 в об'ємі.

Теоретичні підрахунки і практика використання ехометода показують, на формування ехосигналів в першу чергу впливає геометричний фактор – місцезположення і форма відбивачів. По-друге – впливає інтерференція хвиль, трансформація типу хвилі, перевідбиття. В деяких випадках ці ефекти сильно викривлюють ехосигнали, в деяких випадках вони несуттєві. Можна досить визначено сказати, що якщо дефект має прозву чутяні поверхні з не досить низьким коефіцієнтом відбиття, то буде спостерігатись ехосигнал і, отже, буде здійснюватись формування його зображення. Трансформовані і перевідбиті хвилі будуть створювати додаткові хвилі, що будуть показані, як помилкові зображення дефектів. Більш детальну інформацію про відбивачі (елементи дефекту) одержують за допомогою прозвучування об'єкту контролю в різних напрямках, або шляхом сканування. В результаті одержують набір розподілу ехосигналів $F_i(L)$, i – індекс, що характеризує положення сканера по відношенню до поверхні ОК. Далі здійснюється спільна обробка функцій $F_i(L)$ з метою реконструкції зображення відбивачів в площині сканування.

Розглянемо питання про можливість вирішення оберненої задачі в рамках приведеної моделі. Ключову роль в даному випадку відіграє функція відгуку точкового джерела. В вузькополосному і широкополосному наближенні ФВТД являється ядром оператора перетворення об'єкта контролю в ехосигнали. Якщо мається достатньо велика кількість прозвучування якої-небудь області матеріалу з однією і той же ФВТД, то можна говорити про існування глобального оператора прозвучування, позначимо його Γ . Даний оператор здійснює перетворення функції об'єкту контролю $O(r)$ в набір ехосигналів.

$$F = \Gamma(O). \quad (3)$$

Оператор Γ є лінійним інтегральним оператором. Припустимо, що Γ має наступні властивості:

- мінливість, тобто $\Gamma[K \cdot O] = K \cdot \Gamma[O]$, K – сталий множник,
- адитивність, тобто $\Gamma[O_1 + O_2] = \Gamma[O_1] + \Gamma[O_2]$ де O_1, O_2 – дві неперетинаючі неоднорідності в матеріалі,

- однозначність, тобто любому об'єкту контролю O відповідають свої оригінальні ехосигнали F . Іншими словами, оператор Γ є повний.

Якщо оператор Γ володіє вказаними властивостями, то існує оператор оберненого перетворення Γ^{-1} , такий що

$$O = \Gamma^{-1}[F]. \quad (4)$$

Доказ існування і одиничності оператора Γ^{-1} впливає із теорії груп. Відмітимо, що більшість засобів вирішення оберненої задачі, основаних на даному теоретичному підході, використовує властивості лінійності, адитивності та повноти оператора Γ . Власне, саме ці властивості оператора прозвучування забезпечують можливість побудови зображення дефектів.

Перше наближення оберненої задачі є в тому, що реконструкції підлягає функція ОК $O(r)$, а не функція границь $I(r)$. Вони пов'язані між собою через коефіцієнт відбиття (формула 1). Припускається, що коефіцієнт відбиття кожного елементу поверхні дефекту є однаковий для всіх схем озвучування. Грубо кажучи, поверхня дефекту представляється сукупністю сферичних відбивачів малого розміру. Цілий ряд наближень пов'язаний з властивістю адитивності операторів Γ і Γ^{-1} . Адитивність сигналів по відношенню до відбиваючої поверхні забезпечується, якщо УЗ хвилі відбиваються в ОК тільки один раз, тобто відсутні ехосигнали двократно та багатократно відбитих хвиль. В альтернативному випадку виникає неоднозначність інтерпретації сигналів і теоретичне і практичне вирішення оберненої задачі не може бути виконане.

Висновки

Постановка і вирішення оберненої задачі, основаної на точних рішеннях хвильового рівняння є проблематичною або навіть неможливою. Більш прості моделі формування сигналів дозволяють сформулювати обернену задачу і вирішити її. Проте розглянуті моделі, в основному, приймають до уваги лише амплітудні дані відбитого хвильового поля та побудовані на принципі інтерференції звукових хвиль. Все вищесказане дозволяє констатувати, що незалежно від алгоритму реконструкції відображення дефекту, він, по суті, є лише інтерпретатором дефекту, тобто на основі деяких принципів і уявлень про формування сигналів алгоритм здійснює розрахунок зображення. Тому завжди є доля вірогідності, що деякі дефекти не будуть представлені на зображенні, або навпаки можуть сформуватись помилкові картини дефектів (артефакти).