

РОЗВИТОК МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ НЕОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ: ВІД ГЕОАКУСТИКИ ДО КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ

The historical, theoretical and applied aspects of development of researches in the Karpenko Physico-Mechanics Institute of the NAS Ukraine on a scientific problem of image restoration with use of non-optical wavelengths, which started by Cor. NAS of Ukraine V. Mikhailovskiy and the results of which were used in geo- and hydroacoustics, testing equipment, ultrasonic control, and radioastronomy, are presentsd.

Keywords: *image restoration, non-optical wavelengths, development of researches, geoacoustics, hydroacoustics, testing equipment, ultrasonic control, radioastronomy.*

Розглянуто історичний, теоретичний і прикладний аспекти розвитку у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України досліджень з наукової проблеми відновлення зображень у неоптичних діапазонах хвиль, які започатковані чл.-кор. НАН України В. М. Михайловським, і результати яких знайшли застосування у геоакустиці, гідроакустиці, випробувальній техніці, ультразвуковому контролі та радіоастрономії.

Ключові слова: *відновлення зображень, неоптичні довжини хвиль, розвиток досліджень, геоакустика, гідроакустики, випробувальна техніка, ультразвуковий контроль, радіоастрономія.*

Постава проблеми. У статті основна увага зосереджена на тих наукових і прикладних результатах, які отримані у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка (ФМІ) НАН України з кінця 50-х років минулого сторіччя по сьогоднішній день у відділах № 21 (завідувач відділу чл.-кор. АН України Михайловський Володимир Миколайович) і № 23 (керівник відділу к.т.н. Кошовий, колишній аспірант В. М. Михайловського) у процесі дослідження методів та інформаційних технологій відновлення неоптичних зображень (ВНЗ) внутрішньої структури неоднорідних середовищ і матеріалів з використанням фізичних полів різної природи (акустичних, електромагнітних тощо).

Технології ВНЗ є одними із найбільш інформаційноємних серед перспективних інформаційних технологій. Їм притаманна інформаційна надлишковість, адаптивність, високі чутливість і точність. Ця робота презентує концептуально історію і особливості розвитку досліджень з цієї проблеми у ФМІ НАН України з кінця 50-х років минулого сторіччя по сьогоднішній день. Ключову роль у започаткуванні і становленні цих досліджень відіграв В. М. Михайловський. В історії розвитку і у структурі досліджень з цієї проблеми у ФМІ НАНУ можна виділити декілька напрямків (послідовних етапів), зокрема: геоакустика (оконтурювання рудних тіл [1]), пошукова гідроакустика (звукобачення [9], цифрова голографічна гідролокація [10]), випробувальна техніка (управління потужними акустичними полями в акустичних випробувальних камерах [11]), ультразвуковий контроль (ультразвукова комп'ютерна томографія [14]), радіоастрономія (декаметровая радіотомографія [33]).

Метою всіх цих досліджень було розроблення нових методів, інформаційних технологій та технічних засобів ВНЗ на основі реєстрації та просторово-часової обробки параметрів акустичних або електромагнітних полів. Предметні області і об'єкти досліджень по кожному із напрямків, де були застосовані методи ВНЗ, суттєво відрізняються. Але всі вони об'єднані єдиним інформаційним підходом і кінцевою діагностичною задачею, яка полягає в отриманні дистанційно інформації про об'єкт або його внутрішню структуру (характеристики) у вигляді звичного для зорового апарату дослідника (споживача) оптичного (2D- або 3D-) зображення.

© В. В. Кошовий, 2014

Сформулюємо характерні ознаки чи вимоги, яким повинні відповідати фізичні методи та інформаційні технології ВНЗ. На рис. 1 наведена споглядальна схема, яка характеризує цю діагностичну ситуацію.

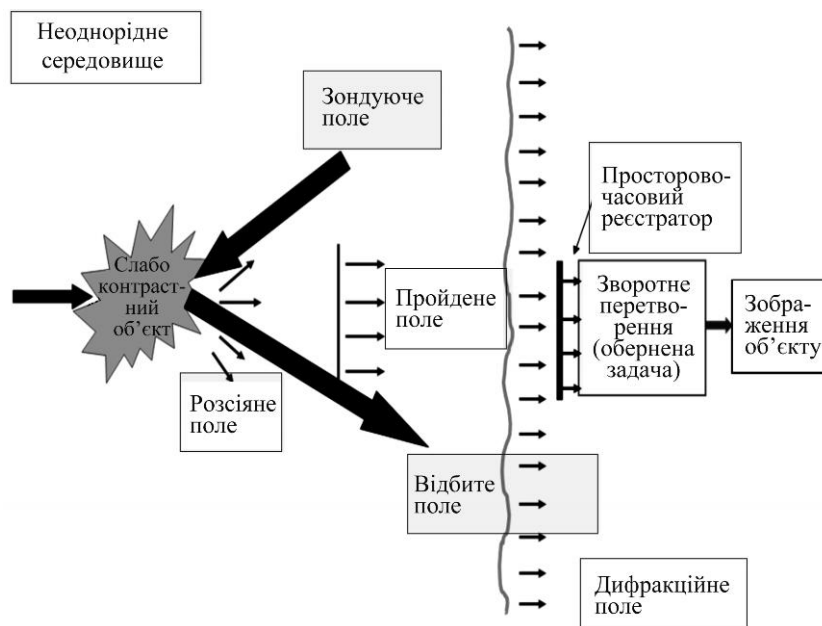


Рис. 1. Споглядальна схема діагностичної ситуації, яка відображає основні компоненти інформаційних технологій відновлення неоптичних зображень.

Зондує поле взаємодіє із об'єктом і середовищем, формуючи дифракційне поле, яке далі поширюється в середовищі. Інформаційні параметри цього поля, які містять інформацію про об'єкт і середовище, реєструються приймальним просторово-часовим реєстратором. Вибір типів зондуєчного та реєстрованого полів (відбите, розсіяне або пройдене крізь об'єкт (трансмісійне), а також приймального реєстратора (антени) визначає фізичний метод дистанційного зондування. Подальші інформаційні технології повинні реалізувати відповідне зворотне перетворення (розв'язання оберненої задачі), в результаті якого формується набір інформативних ознак у вигляді відновленого (реконструйованого) зображення, на базі якого об'єкт може бути виділений та ідентифікований (або розпізнаний).

Оскільки у більшості практичних задач досліджувані об'єкти є слабконтрастними і мають більш-менш детерміновану форму, а неоднорідність властивостей середовища має просторово-випадковий характер або певну детерміновану анізотропію, то фізичні методи та інформаційні технології реконструкції зображень в цьому випадку повинні мати такі властивості: *інформаційну надлишковість*, яка забезпечується завдяки багатократній взаємодії зондуєчного поля з кожним пікселем середовища; *адаптивність* до умов неоднорідного середовища внаслідок формування статистичного еталону середовища або ітераційних процедур наближення моделі середовища до його реальних параметрів, *високу чутливість*, оскільки внесок слабконтрастного об'єкту в енергетику дифракційного поля дуже незначний; *високу точність*, оскільки зворотні задачі є в принципі некоректними і реалізація зворотного перетворення вимагає високої точності вимірювання параметрів дифракційного поля і процедур регуляризації.

Етапи, методи і засоби досліджень. Геоакустика. Цей етап відноситься до періоду 1958–1972 рр. При існуючому на той час рівні розвитку гірничорудної справи відчувалася гостра необхідність у вишукуванні ефективних і економічних методів внутрішньорудникової геофізичної розвідки. Наприклад, у Криворізько-

му басейні, який був основною залізорудною базою СРСР (у балансі товарної руди країни видобуток гірничих підприємств Кривбасу становив приблизно половину). Але складність форми і структури рудних тіл, різка зміна їх контурів з глибиною призводили до того, що у процесі експлуатації родовища доводилося виконувати значні обсяги пошукових і розвідувальних робіт. Ці роботи в той час здійснювалися шляхом бурінням дорогих свердловин і проходженням гірничих виробок. Однак застосування таких методів вимагало великих витрат часу і коштів і не давало достатньої інформації, оскільки пробурена свердловина давала змогу досліджувати лише невеликий обсяг гірських порід, зокрема надавала можливість оконтурювати рудні тіла при обмеженій кількості свердловин.

Тому актуальною була задача розроблення непрямих методів внутрішньорудничної розвідки, які давали б змогу отримувати інформацію про макронеоднорідності гірських порід, такі як нові або невиявлені бурінням рудні тіла, карстові утворення, штучні порожнини тощо. При цьому цінною є інформація про локалізацію залягання цих макронеоднорідностей, їх форму і розміри. У зв'язку з цим потрібні були нові ідеї для розробки спеціальної методики і техніки досліджень, нової апаратури і особливих прийомів інтерпретації одержуваних даних. Це зумовлювало і те, що розв'язання задачі виявлення і оконтурювання рудних тіл і пустот, крім актуальності і важливого прикладного значення, набувало на той час і наукового інтересу.

Така робота була розпочата з ініціативи академіка АН УРСР М. П. Семененко, який запропонував досліджувати можливість виявлення і локалізації рудних тіл в товщі порід у рудничних умовах Криворізького залізорудного басейну непрямими методами. За ініціативи В. М. Михайловського було визначено, що найперспективнішими непрямими методами виявлення неоднорідностей в гірничих умовах є методи, що використовують можливість диференціації гірських порід за їх акустичними характеристиками (пружними властивостями).

Групою співробітників відділу № 21 ФМІ НАНУ в складі В. М. Первушина, О. І. Цихана, Я. Є. Беленького, В. В. Кошового та інших під керівництвом В. М. Михайловського за результатами лабораторних і натурних досліджень, в умовах рудників Криворізького гірничорудного басейну, були визначені основні умови і параметри існування рішення поставленої задачі [1]:

- фізичний агент – поздовжні пружні коливання;
- смуга частот – тональний діапазон (300 Гц...10 кГц);
- особливість випромінювання – ненаправлене;
- особливість прийому – висока завадостійкість;

– метод пошуку – наскрізне імпульсне прозвучування гірської породи (середовища) між квершлагами при фіксованій, але підстроюваній частоті заповнення зондуючих імпульсів, за схемою, коли у двох сусідніх (часто паралельних) квершлагах АВ і СД (рис. 2а) розміщалися система випромінюючих електродинамічних вібраторів [2] і приймальних акустичних перетворювачів (геофонів), за допомогою яких середовище між квершлагами прозвучувалося у різних напрямках; для реалізації методу в промислових умовах рудників Кривбасу був створений експериментальний зразок геоакустичної апаратури ГАС-1 (рис. 2б);

– обробка інформації – формування частотно-селективної тіні при прозвучуванні (рис. 3) за результатами багатоканальної реєстрації амплітуди пройдених крізь середовище акустичних хвиль із подальшим застосуванням інформаційної технології зворотного перетворення на основі геометричного оберненого проектування для побудови контурів рудного тіла (або іншої макронеоднорідності) на основі визначення положень максимумів частотно-селективної тіні, зареєстрованої при прозвучуванні [3].

Отже, вперше на той час під керівництвом В. М. Михайловського були розроблені і апробовані в умовах рудників Кривбасу геоакустичний метод і промис-

лова апаратура, які давали змогу проводити пошук і оконтурення рудних тіл з мінімальним акустичним контрастом $\sim 1\%$ щодо гірської породи.

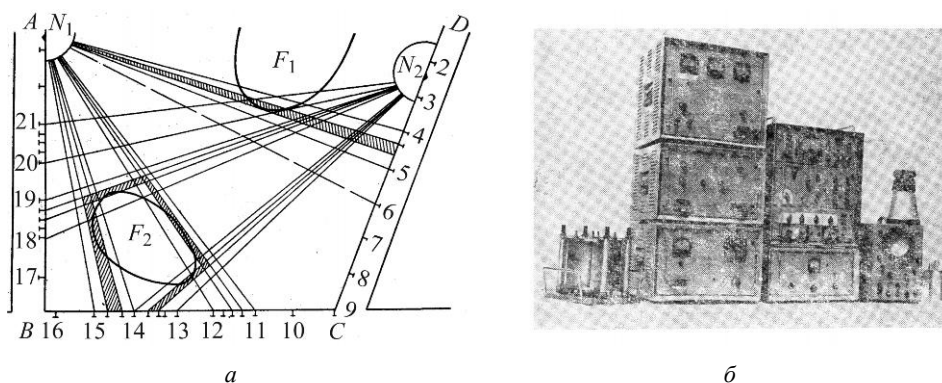


Рис. 2. Схема прозвучування гірничої породи між квершлагами (а) та апаратурний комплекс ГАС-1 (б) для її реалізації.

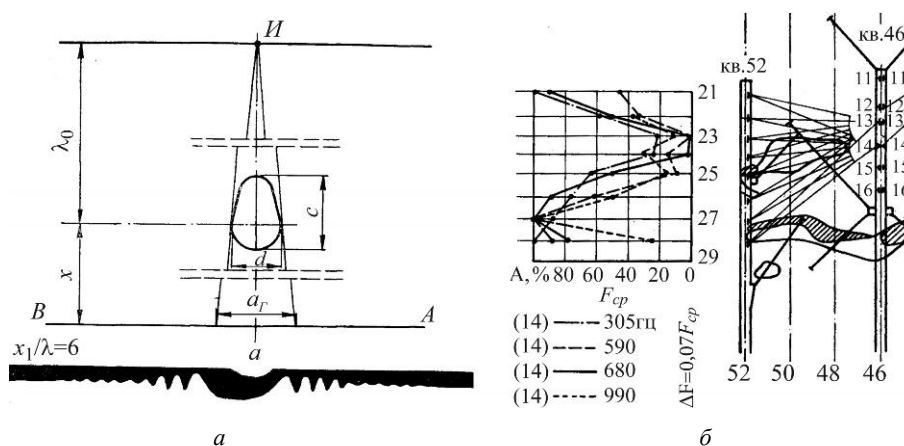


Рис. 3. Типовий вигляд частотно-селективних тіней, зареєстрованих засобами гідроакустичного моделювання методу прозвучування [4] (а) та апаратурним комплексом ГАС-1 [5] в промислових умовах рудників Кривбасу (б).

Використовуючи сучасну термінологію, розроблений метод реалізував класичну схему променевої трансмісійної акустичної томографії. Томографія (від грецького слова $\tau\omicron\mu\eta$ – переріз) – “немодельний” метод експериментального визначення внутрішньої структури об’єкта шляхом багатократного зондування його з поверхні в різних напрямках, який відрізняється від розрахункових обернених задач. Початок розвитку томографії пов’язують з інтегральним перетворенням Радона, запропонованим австрійським математиком Йоганом Радонам у 1917 р. [6]. Однак робота Радона в свій час була незаслужено забута. У 1963 р. американський фізик Алан Кормак повторно (відмінним від Радона способом) розв’язав задачу томографічної реконструкції, а в 1969 р. англійський інженер-фізик Годфрі Хаунсфілд (фірма EMI Ltd.) сконструював “EMI-scanner” – перший комп’ютерний рентгенівський томограф. У 1979 р. Кормак і Хаунсфілд отримали Нобелівську премію в галузі фізіології і медицини “за розвиток комп’ютерної томографії”, а у 2003 р. таку ж премію отримали П. Менсфілд та П. Лотербур за винахід методу магнітно-резонансної томографії.

Суть методу променевої томографії полягає у:

– визначенні (вимірюванні) проєкційних даних (усереднених вздовж напря-

му поширення інформаційних параметрів зонduючого сигналу) – *пряма задача*;
 – реконструкції просторового розподілу (ПР) неоднорідностей на основі вимірюваних проєкційних даних – *обернена задача*.

Перетворенням Радона називається функція (1), яка має простий геометричний зміст – це інтеграл від функції вздовж прямої AA' (рис. 4), перпендикулярної до вектора $\vec{n} = (\cos \alpha, \sin \alpha)$, яка проходить на відстані s (виміряній вздовж вектора \vec{n} з відповідним знаком) від початку координат.

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz. \quad (1)$$

Отже, запропонований і практично реалізований під керівництвом В. М. Михайловського у 1958–1968 рр. метод геоакустики фактично ґрунтувався на цій, тепер класичній, інформаційній технології і був серед піонерів становлення і практичного застосування цього наукового підходу.

Гідроакустика. Цей етап відноситься до періоду 1971–1984 рр. і пов'язаний передусім із формуванням виробничих потужностей гідрофізичного полігону на Шацькій експериментальній базі (ШЕБ) ФМІ, становлення якого, в основному, для гідроакустичних досліджень, відбувалося за активної участі В. М. Михайловського. У цей період у ФМІ співробітниками В. М. Михайловського був запропонований новий теоретичний підхід для опису процесу ВНЗ, зокрема процесу відновлення акустичних зображень (ВАЗ). Цей підхід ґрунтувався на загальних принципах теорії передачі інформації, що активно розвивалася у світі у цей час, і дав змогу науково обґрунтовано підійти до визначення множини і вибору можливих систем ВНЗ та встановити умови, необхідні для відновлення зображення [7, 8]. В рамках цього підходу була запропонована така інтерпретація (інформаційна модель) процесу ВНЗ:

- процес відбиття акустичної хвилі від об'єкта і формування дифракційного поля розглядається як кодування властивостей об'єкта в параметрах цієї хвилі;
- процес відновлення зображення – це процес “декодування”, тобто процес відновлення (реконструкції) просторового розподілу параметрів акустичного поля на поверхні об'єкта, а на їх основі відновлення властивостей об'єкта (форма, матеріал тощо);
- при такому підході структура системи ВНЗ розглядається як послідовне з'єднання двох блоків – кодуючого і декодуючого;
- важливим елементом в такій системі передачі інформації є носій інформації, який у системах ВНЗ має просторово-часово-частотний характер, а його модель розробляється на основі умовної декомпозиції об'єкта на окремі елементи; ця композиція може бути здійснена по-різному залежно від постановки задачі і наявності апріорної інформації про об'єкт; поле, сформоване одним елементом об'єкта, т.з. “функція розсіювання” точкового об'єкта, і розглядається як носій інформації; дифракційне поле в області спостереження розглядається як сума цих носіїв інформації; спостережуване дифракційне поле є “сумішшю” носіїв інформації;
- можливість здійснення процесу ВНЗ пов'язана з можливістю розділення

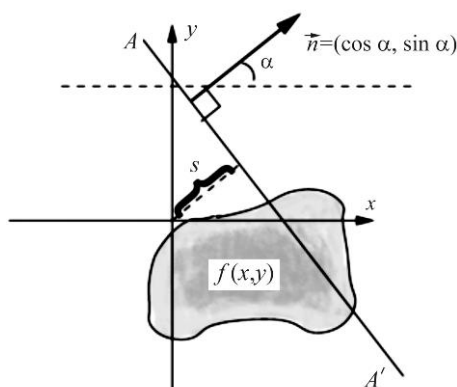


Рис. 4. Двовимірне перетворення Радона.

носіїв інформації, а необхідною умовою цього є ортогональність або лінійна незалежність носіїв інформації; використовуючи вказані властивості носіїв інформації, їх можна розділити, виділити необхідну частину, виміряти значення інформативних ознак; у граничному випадку, коли носієм інформації є дифракційне поле самого об'єкта, задача ВНЗ зводиться до задачі розпізнавання (виявлення об'єкта на фоні інших, відмінних від нього); відновлене зображення об'єкта у площині зображень перетвориться в цьому випадку в точку.

– формування різних типів носіїв інформації може бути реалізовано завдяки зміні просторово-часово-частотних параметрів зонduючого поля і різних методів реєстрації дифракційного поля; тобто їх формування, відповідно, і побудова різних систем ВНЗ прямо пов'язані з можливостями системи опромінення (озвучування об'єкта) і системи реєстрації поля, які, в свою чергу, визначаються поставленою задачею, характеристиками об'єктів пошуку (контролю) і властивостями середовища.

Викладені вище принципи і фізико-математичні аспекти процесу ВНЗ дають змогу подати його у вигляді моделі з використанням теорії лінійного розділення сигналів у багатоканальних лініях зв'язку. Інформаційні перетворення у цій моделі розглядають за такою схемою [8, 9]:

$$A \Rightarrow q \Rightarrow O \Rightarrow r, \quad (2)$$

де A – зонduюча дія; q – об'єкт; r – вимірювані параметри дифракційного поля; O – зображення об'єкта.

Покладаючи, що перетворення $q \Rightarrow O$ є взаємоднозначним (інакше об'єкти будуть акустично нерозрізнені) і порівнюючи перетворення (2) з узагальненою схемою передачі інформації, перетворення $O \Rightarrow r \Rightarrow \tilde{O}$ і можна розглядати як своєрідне кодування і декодування. Можливість реалізації декодування $r \Rightarrow \tilde{O}$ (рис. 5), тобто відновлення зображення, залежить від виду перетворення $O \Rightarrow r$, множина реалізацій якого і визначає множину можливих методів і систем ВНЗ.

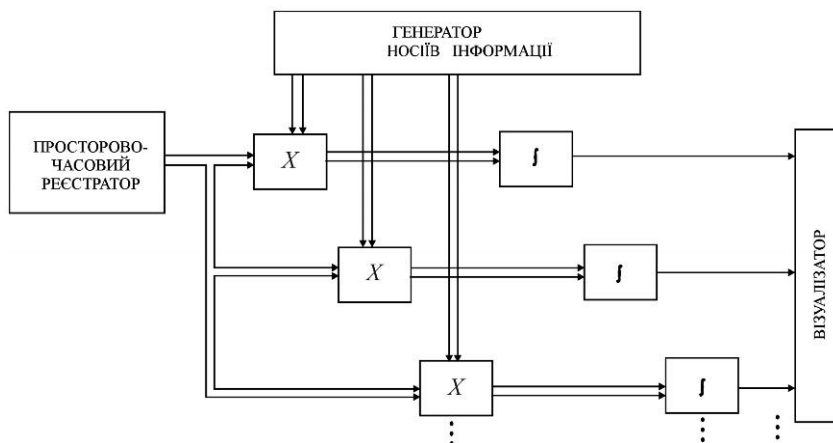


Рис. 5. Структура системи відновлення неоптичних зображень.

Запропонована інформаційна модель була апробована при розробці у відділі В. М. Михайловського гідроакустичних пошукових систем, зокрема, звукооптичної та голографічної. Вперше на той час були створені експериментальні зразки пошукових гідроакустичних систем для виявлення підводних об'єктів спеціального призначення, в т.ч. замулених. Серед них:

- звуковізор з твердотільною акустичною лінзою для пошуку кабельних ліній зв'язку [9];
- цифровий голографічний гідролокатор ближньої дії (рис. 6а) із 128-канальною високочастотною (~1 МГц) приймальною антеною для пошуку замулених

об'єктів і 16-канальною низькочастотною (~ 10 кГц) для пошуку замулених об'єктів (рис. 6б) [10]; на рис. 6 наведені також зображення типового циліндроподібного об'єкта пошуку (рис. 6в) та сформовані цим гідролокатором гідроакустичні зображення цього об'єкта у водному (рис. 6з) та у замуленому (рис. 6д) середовищах.

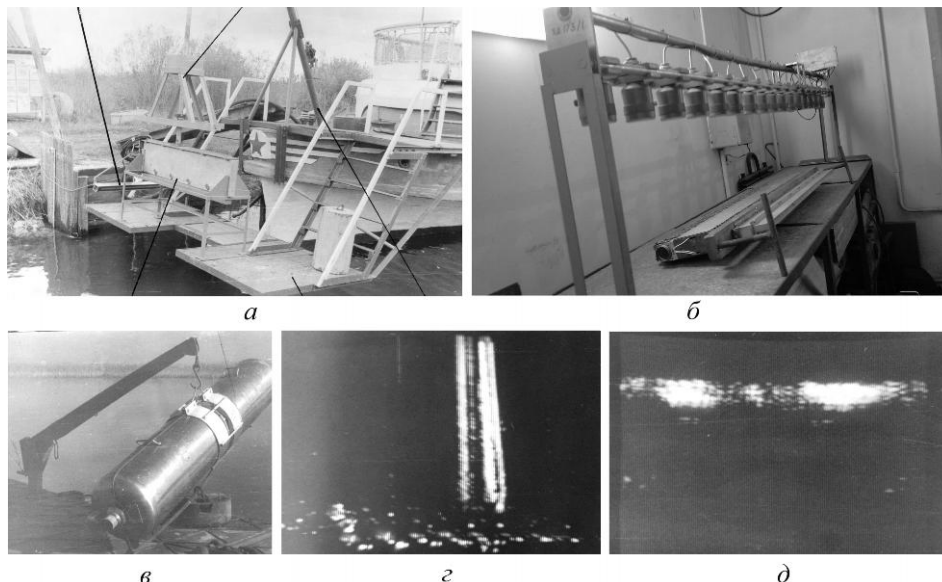


Рис. 6. Цифровий голографічний гідролокатор ближньої дії (а); 128-канальна високочастотна (~ 1 МГц) і 16-канальна низькочастотна приймальні антени (~ 10 кГц) (б); типовий об'єкт пошуку (в); відновлені гідроакустичні зображення об'єкта пошуку у водному (з) та замуленому (д) середовищах.

Випробувальна техніка. Вперше також на той час на основі застосування розробленої інформаційної моделі процесу ВНЗ був реалізований новий підхід до побудови систем управління акустичними випробуваннями виробів аеро-космічної техніки, при якому керування просторовими характеристиками інтенсивного акустичного поля на поверхні об'єкта, поміщеного в акустичну випробувальну камеру, здійснювалося на основі методу перевипромінювання. Фактично це метод низькочастотної аналогової акусто-електронної голографії в повітрі. Експериментальний зразок такої системи, який містить апаратний комплекс, керуючу та керовану акустичні камери, і впроваджений в НДІ Автоматичних систем (Москва), наведений на рис. 7.

Томографічні технології ВНЗ та нові області їх застосування. З початку 80-х років минулого століття учні та послідовники В. М. Михайловського на основі отриманого під його керівництвом наукового доробку продовжили освоєння нових областей застосування методів та інформаційних технологій ВНЗ. Це – радіоастрономія і радіофізика ближнього космосу, з одного боку, і неруйнівний контроль (ультразвукові методи), з другого. Таким чином, розроблені теоретичні підходи та методи ВНЗ необхідно було розвинути для електромагнітних полів радіодіапазону, що зумовлено початком робіт із створення на ШЕБ ФМІ декаметрового радіотелескопа УРАН-3, а також новими об'єктами досліджень і середовищем поширення – космічними радіоджерелами і космічною плазмою. А в акустичному (ультразвуковому (УЗ)) діапазоні необхідно було перейти до дослідження можливостей методів ВНЗ у такому середовищі поширення акустичних хвиль як тверде тіло, і для таких типів об'єктів як дефекти, зони концентрації напружень, об'ємна неоднорідність фізико-механічних характеристик матеріалів тощо. Більшість із вищенаведених об'єктів належать до класу слабконтрастних (щодо

оточуючого середовища або фону). Отриманий у ФМІ попередній досвід (на прикладі геоакустики), а також світовий досвід [12] підтвердили, що найбільш перспективними для діагностики цього класу об'єктів є інформаційні технології комп'ютерної томографії (КТ). Тому саме цим технологіям і було приділено найбільше уваги в подальших дослідженнях.

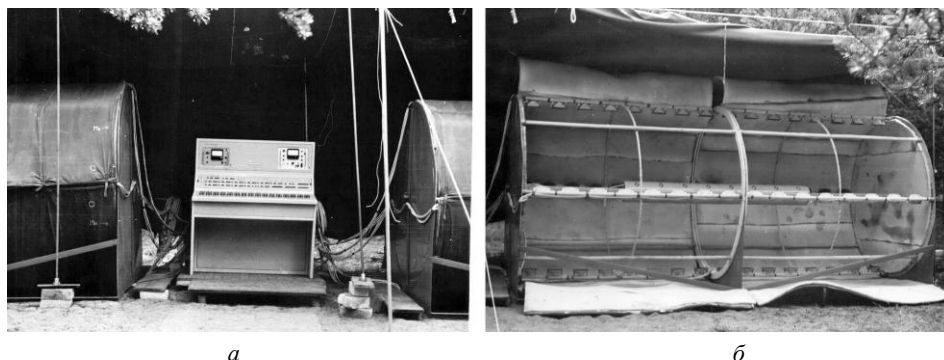


Рис. 7. Експериментальний зразок апаратури (а) і двох акустичних камер, керуючої (ліворуч від апаратури) і випробувальної (б).

Провідні фахівці в галузі КТ стверджують, що застосування томографічних методів є неминучим етапом еволюції майже всіх діагностичних систем [13]. На досить високому рівні розвитку техніки дистанційного зондування і засобів обробки даних з'являється можливість реконструювати просторову структуру всередині об'єкта на основі зондування ззовні і застосування методів КТ для обробки зондуючих сигналів. Успіх у застосуванні цих методів залежить від їх адекватності задачі визначення внутрішньої структури об'єкта і визначається особливостями взаємодії зондуючого поля з об'єктом, які повинні забезпечити простоту (продуктивність) схеми збору даних, томографічного відновлення при високій достовірності. Саме цим зумовлені найбільші успіхи у застосуванні методів КТ, досягнуті в медицині. Таким же багатообіцяючим є застосування УЗ методів КТ для дослідження фізико-механічних характеристик (ФМХ) і параметрів неоднорідного напружено-деформованого стану (НДС) конструкційних матеріалів.

Ультразвуковий контроль. Сучасні тенденції у неруйнівному контролі (НК) та технічній діагностиці (ТД) відповідальних виробів і конструкцій атомної енергетики, ракетно-космічної техніки, авіа- та суднобудування зумовлені передусім необхідністю діагностики пошкодженості матеріалу на більш ранніх стадіях, які передують утворенню і розвитку дефекту. У процесі аналізу зародження дефектів виділяють мікро-, мезо- і макрорівень [20]. Зародження дефектів починається на мікрорівні. На мезорівні зародження дефектів тісно пов'язане зі змінами фізико-механічних характеристик матеріалу та параметрів напружено-деформованого стану. У зв'язку із цим можна розглядати два стани матеріалу, зокрема, дефектний та переддефектний (ПДФ), коли сформовані дефекти (несуцільності) матеріалу відсутні.

Оцінка ПДФ стану матеріалу повинна завчасно прогнозувати місця можливого виникнення дефектів. Яскравою ілюстрацією цих тенденцій є розробка і впровадження нових інспекційних програм НК устаткування АЕС в робочому режимі. Зокрема, програма ISI (In-service Inspection Programs) як складова частина комплексного підходу із забезпечення радіаційної безпеки АЕС. На програми ISI покладається, перш за все, виявлення та оцінювання ступеня пошкодженості металу вузла (чи компоненти) АЕС на більш ранніх стадіях, ніж це може виявити автоматизована система безпеки.

Визначальною особливістю ПДФ стану металу є той факт, що він характеризується неоднорідним просторовим розподілом (ПР) його ФМХ, в тому числі параметрів НДС. Процеси, що визначають втому, деградацію чи старіння металу в процесі експлуатаційних навантажень, зародження мікротріщин тощо, сприяють формуванню локальних аномальних зон передруйнування, що характеризуються неоднорідністю ПР властивостей металу, посилений розвиток яких супроводжується зародженням дефектів. Таким чином, визначення об'ємного розподілу тої чи іншої ФМХ металу та його аналіз є достатньо інформативним методом для оцінки ПДФ стану металу та прогнозу локальних областей (зон) імовірного зародження дефектів.

У наукових працях співробітників ФМІ НАНУ було з'ясовано, що для визначення ПР ФМХ матеріалу у ПДФ стані адекватними є методи ультразвукової КТ (УЗКТ) [14–19]. Адекватність можливостей методів УЗКТ задачі визначення ПР ФМХ в об'ємі матеріалу у ПДФ стані зумовлена високою інформативністю та завадостійкістю методів КТ, а також тим, що у процесі аналізу процесу поширення УЗ поля в матеріалі у ПДФ стані справедливі закони геометричної акустики, що суттєво спрощує схему збору даних та алгоритми томографічної реконструкції.

Дефекти матеріалу (включення, несучільності тощо) за характером взаємодії з ультразвуком поділяють на контрастні і слабоконтрастні. Контрастні дефекти виявляють луно-методами. Значно складнішою є задача виявлення і класифікації слабоконтрастних дефектів (неоднорідностей), для виявлення яких інформативнішими є трансмісійні методи і методи, що ґрунтуються на реєстрації розсіяного структурою матеріалу УЗ сигналу.

На цей час на світовому ринку діагностичного обладнання серійних зразків ультразвукових комп'ютерних томографів, які реалізують методи реконструктивної 2D- та 3D-томографії для неруйнівного визначення об'ємної однорідності властивостей твердотільних матеріалів в промислових умовах, поки що немає. А основними засобами УЗ контролю (УЗК) є різні види УЗ дефектоскопів, призначені для оцінки дефектності виробу, і які здатні забезпечити високу чутливість виявлення дефектів, визначати їх форму, розміри та орієнтацію. Томографічні методи теж дають змогу виявляти дефекти, причому такі, рівень сигналів від яких може бути значно нижче рівня завад, і забезпечувати високу якість їх класифікації.

Починаючи з 1982 р. у ФМІ розроблено методи і засоби УЗКТ, призначені як для вирішення задач дефектоскопії, так і для оцінки ПДФ стану матеріалу виробів довготривалої експлуатації. Зокрема, для задач УЗ дефектоскопії розроблені томографічні методи оцінки дефектності виробів тороїдальної форми, метод адаптивного формування проекцій (АФП), томографічні методи класифікації дефектів, відновлення ПР коефіцієнта форми, коефіцієнта трансформації, побудови діаграм коефіцієнта відбиття. Ці підходи є унікальними, експериментально апробованими і можуть з успіхом застосовуватись при виявленні та класифікації слабоконтрастних дефектів. Саме ці методи дали змогу експериментально отримати унікальний результат з виявлення слабоконтрастного дефекту розміром суттєво меншим за довжину зондуючої хвилі, що принципово неможливо при одиночних вимірюваннях.

Для відновлення томографічних зображень (ТЗ) дефектів за наявності високого рівня завад (відношення сигнал/шум менше одиниці) був розроблений метод АФП, який ґрунтується на формуванні статистичного еталону контрольованого виробу та побудові ТЗ відмінностей ПР дефектів від статистичного еталону. Причому для кожної пари перетворювачів (випромінювач-приймач) за результатами сканування виробу, реєстрації і обробки пройденого УЗ сигналу, тобто для кожної проекції, встановлюється адаптивний поріг. Такий підхід дав можливість

виявляти слабоконтрастні дефекти у виробках при високому рівні завад, що неможливо традиційними методами УЗК.

Метод АФП був використаний при розробці ряду автоматизованих томографічних УЗ установок, зокрема “КОНТРАН” та СИСТЕМА-4. Перша з них (рис. 8а) впроваджена на Сарненському машинобудівному заводі і призначена для УЗК анкерних обойм мостових конструкцій на наявність в них дефектів типу несучільності матеріалу, а саме найбільш небезпечних з них – радіальних тріщин. Для забезпечення їх виявлення розроблена оригінальна схема збору даних, яка реалізує прозвучування і огляд виробу за допомогою багатоелементного УЗ перетворювача, розташованого на зовнішній поверхні циліндра вздовж його осі. При цьому відновлюється томографічне зображення класифікаційних ознак дефекту – коефіцієнта трансформації хвиль.

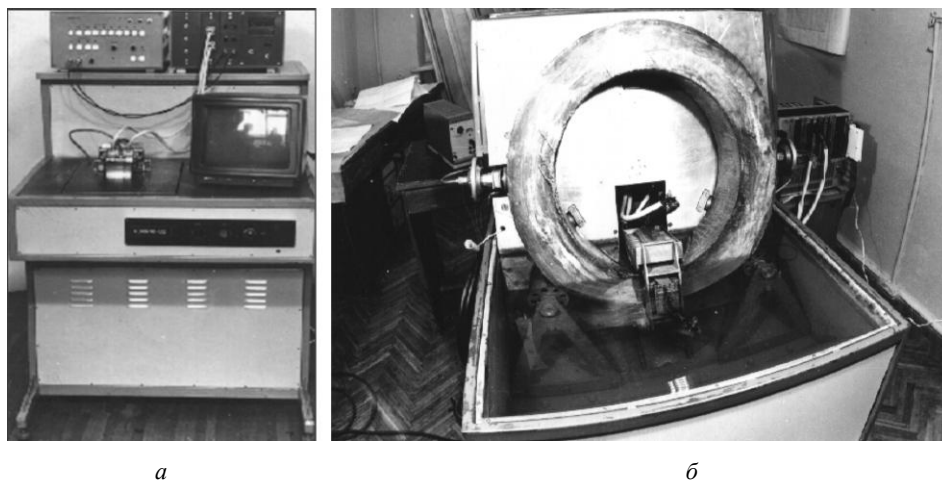


Рис. 8. Експериментальні зразки томографічних установок “КОНТРАН” (а) для автоматизованого ультразвукового контролю анкерних обойм мостових конструкцій та СИСТЕМА-4 (б) ультразвукового контролю виробів кільцеподібної форми із вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу.

Важливою віхою в розвитку проблеми УЗКТ для розв’язання задач НК є співпраця ФМІ з Конструкторським Бюро “Південне”, Дніпропетровськ. Для УЗК виробів кільцеподібної форми із вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу аерокосмічного призначення розроблена томографічна установка СИСТЕМА-4 (рис. 8б). Особливості вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу з погляду УЗК: 1) неоднорідна внутрішня структура й анізотропія акустичних властивостей, що призводить до необхідності враховувати рефракцію УЗ хвиль при побудові зображення ПР дефектів у виробі; 2) значне поглинання УЗ хвиль, яке зумовлює низькі значення с/ш при реєстрації УЗ сигналів і, відповідно, обмежує застосування методів УЗК в цьому випадку лише трансмісійним методом при прозвучуванні перерізу виробу; 3) значна шорсткість поверхні виробу, що зумовлює значні зміни амплітуди УЗ сигналу в результаті її впливу, які виступають як інтенсивні завади, що можуть перевищувати рівень сигналу, і на фоні яких необхідно виявити та ідентифікувати дефекти. Застосування саме томографічного методу АФП дало змогу значно зменшити вплив цих факторів і розв’язати проблему УЗК дефектності цього класу виробів.

Значно ширше у ФМІ були розвинуті і розвиваються у даний час томографічні методи і засоби експериментального визначення ПР акустичних і ФМХ та параметрів неоднорідного НДС.

Основні принципи технології УЗКТ для контролю ПДФ стану матеріалу. Неоднорідності матеріалу у ПДФ стані, що виникають у процесі експлуатації або після застосування різних технологічних операцій (термообробка, механообробка тощо), є слабкоконтрастними і повільно змінними (в просторі і часі), і тому спричиняють лише незначні зміни (долі відсотка) акустичних характеристик (АХ) матеріалу. Це, з одного боку, вимагає високої точності вимірювання інформативних параметрів УЗ сигналу, а, з іншого, дає можливість обмежитися методами геометричної акустики при описі процесу поширення УЗ хвиль у матеріалі, що суттєво спрощує схеми збору даних і алгоритми томографічної реконструкції.

Для забезпечення високої продуктивності контролю та універсальності томографічних систем щодо форми контрольованого виробу, а також достовірності контролю, враховуючи особливості взаємодії УЗ хвиль з матеріалом у ПДФ стані, у ФМІ був розроблений новий підхід до побудови систем УЗКТ, який ґрунтується на таких принципах [18]:

збір даних променевими проекціями типу

$$p(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(s - x \cos \alpha - y \sin \alpha) dx dy, \quad (3)$$

де $f(x, y)$ – просторовий розподіл неоднорідності; $\delta(s - x \cos \alpha - y \sin \alpha)$ – дельта-функція, яка задає напрям, вздовж якого ведеться проектування;

двоетапність інформаційної технології (ІТ) ВНЗ;

1-й етап:

– застосування операції оберненого проектування (ОП), яка полягає в “розмазуванні” проекції $p(s, \alpha)$ по лінії, що відповідає даній проекції, тобто значення $p(s, \alpha)$ “приписується” всім точкам, що лежать на прямій $s = x \cos \alpha + y \sin \alpha$, і для кожної проекції $p(s, \alpha)$ знаходиться обернена проекція $b(x, y, \alpha) = p(x \cos \alpha + y \sin \alpha, \alpha)$;

– подальша побудова сумарного зображення (СЗ), яке використовується як пошукове, що дає змогу вирішити в процесі збору даних задачу пошуку і локалізації аномальних областей; СЗ отримується шляхом накладання всіх обернених

проекцій $g(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} b(x, y, \alpha) d\alpha$ і є тільки низькочастотною (НЧ) копією шуканого

ПР неоднорідності $f(\vec{r})$ (для двовимірного випадку СЗ є згорткою $f(\vec{r})$ з

ядром $1/r$: $g(\vec{r}) = f(\vec{r}) ** \frac{1}{r}$;

2-й етап:

– застосування ІТ фільтрації проекцій СЗ та побудови шуканого зображення лише аномальних областей на основі операцій ОП без використання трудомістких операцій тривимірного перетворення Фур’є чи згортки.

На основі запропонованого підходу були розроблені методи УЗКТ.

1. Метод 2D-реконструкції на основі оберненого проектування, в якому для визначення ПР неоднорідності $f(\vec{r})$ на основі СЗ $g(\vec{r})$ застосовані операції прямого і оберненого проектування та подвійного диференціювання паралельних проекцій СЗ:

$$p(s, \alpha) \xrightarrow{\hat{B}} g(x, y) \xrightarrow{\hat{B}^{-1}} \bar{p}(s, \alpha) \xrightarrow{-\frac{\partial^2}{\partial s^2}} \bar{p}_{ss}(s, \alpha) \xrightarrow{\hat{B}} f(x, y), \quad (4)$$

де \hat{B} – оператор побудови СЗ шляхом ОП; \hat{B}^{-1} – оператор паралельного проек-

тування; $\bar{p}(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \delta(s - x \cos \alpha - y \sin \alpha) dx dy$ – паралельні проекції, які

отримуються на основі СЗ; $\frac{\partial}{\partial s^2}$ – оператор двократного інтегрування паралельних проекцій.

2. Метод 3D-реконструкції при одноракурсному зборі даних (в конусі) в товстолістових виробках при односторонньому доступі, в якому, на першому етапі для пошуку і локалізації неоднорідностей в об'ємі виробу, на основі операції ОП з врахуванням вибраної схеми збору даних, будується СЗ:

$$g(\vec{r}) = \hat{K}_3^{\theta_0} \{f(\vec{r})\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{(2\pi)} f(\vec{r} + \vec{m}k) \delta(\vec{m} \cdot \vec{n}_{\theta_0}) d\Omega dk, \quad (5)$$

де $\hat{K}_3^{\theta_0}$ – оператор побудови СЗ шляхом ОП проекцій, зібраних в конусі при односторонньому доступі; $\vec{n}_{\theta_0} = (-\cos \varphi \cos \theta_0, -\sin \varphi \cos \theta_0, \sin \theta_0)^T$, θ_0 – кут вводу зонduючого сигналу, $0 \leq \varphi \leq \pi$; у цьому випадку СЗ:

$$g(\vec{r}) = f(x, y, z) *** \frac{\delta\left(z \sin \theta_0 - \cos \theta_0 \sqrt{x^2 + y^2}\right)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (6)$$

Для забезпечення відновлення неоднорідностей по товщині товстолістового виробу необхідно, щоб були зміни неоднорідностей в площині виробу. До таких об'єктів контролю належать товстолістові вироби із зварними з'єднаннями. Для усунення трудомістких операцій тривимірних згорток і Фур'є-перетворень був запропонований алгоритм ВАЗ ПР на основі операцій ОП:

$$f^*(\vec{r}) = -\frac{1}{(4\pi)^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \text{ctg}^2 \theta_0 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \hat{K}_3^{\theta_0} \{g(\vec{r})\}. \quad (7)$$

3. Методи відновлення поля напружень в об'ємі виробу. Розподіл напружень в об'ємі виробу є однією з найважливіших характеристик, що визначає ПДФ стан матеріалу, ймовірність зародження мікротріщин, динаміку розвитку вже сформованих дефектів. Акустодіагностика НДС ґрунтується на ефекті акустопружності [21], який в лінеаризованому вигляді представляє зв'язок між компонентами тензора напружень σ_{in} і відносними змінами часу поширення хвиль τ_{ik} виразом: $\tau_{ik} = \alpha_{ik \ln} \sigma_{in}$, де i – напрям поширення хвиль; k – напрям їх поляризації; $\alpha_{ik \ln}$ – акустопружні коефіцієнти, які визначаються через пружні характеристики матеріалу.

На практиці НДС матеріалу часто має просторово-неоднорідний характер і завданням акустодіагностики є визначення на основі акустичних вимірювань ПР тензора напружень або його компонентів. Неоднорідність напружень і деформацій в об'ємі виробу призводить до появи анізотропії акустичних властивостей, просторові зміни яких мають слабконтрастний характер. Наприклад, небезпечно напружені області за акустичними характеристиками (швидкостями поширення різних типів хвиль) відмінні від ненапружених на долі відсотка [22]. Для ізотропних матеріалів це дає змогу припустити, що УЗ хвилі поширюються за наявності напружень прямолінійно, і для відновлення зображень ПР характеристик НДС використовувати підходи трансмісійної томографії.

В основу томографічного методу відновлення розподілу складових тензора напружень покладена залежність СЗ ПР відносних змін часу поширення хвиль в об'ємі виробу від напрямку осі при коаксимальному способі збору даних. При цьому

можливі різні схеми збору даних. Якщо збір даних проводиться у площинах, перпендикулярних до осей вибраної системи координат, то відновлення здійснюють за вимірюваннями відносної зміни часу поширення поздовжньої хвилі $\tilde{\tau}_l$ і поперечної хвилі з поляризацією у площині збору даних $\tilde{\tau}_v$. При відновленні $\sigma_{ln}(\vec{r})$, на першому етапі, визначають, шляхом ОП, набір СЗ за проєкційними даними, вимірними у відповідних площинах [23]:

$$T = (T_{lXOY}, T_{lYOZ}, T_{lXOZ}, T_{vXOY}, T_{vYOZ}, T_{vXOZ})^T,$$

$$T_{lXOY}(\vec{r}) = T_{lXOY}(\vec{R}, z) = \int_0^\pi \tilde{\tau}_l(\vec{R}, z, \alpha) d\alpha.,$$

де останнє – сума тривимірних згорток ПР компонентів тензора напружень з функціями розсіювання точки [23] $T_i(\vec{r}) = \Phi_{ij}(\vec{r}) *** \sigma_j(\vec{r})$, $\sigma = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23})^T$; $\Phi_{ij}(\vec{r})$ – матриця (6*6) функції розсіювання точки; T_i та σ_j – елементи векторів відповідно T та σ . Сумування здійснюється за j . Зв'язок між компонентами тензора напружень і СЗ в координатній області описується рівнянням $\sigma_i(\vec{r}) = B_{ij}(\vec{r}) *** T_j(\vec{r})$, де $B_{ij}(\vec{r})$ – матриця, що отримується шляхом тривимірного оберненого Фур'є перетворення елементів матриці $A_{ij}^{-1}(\vec{\rho})$, $\sigma_i(\vec{\rho}) = A_{ij}^{-1} \hat{F}_3 \{T_j(\vec{r})\}$; \hat{F}_3 – оператор тривимірного Фур'є перетворення; $A_{ij}(\vec{\rho}) = \hat{F}_3 \{\Phi_{ij}(\vec{r})\}$ – матриця 6*6, елементи якої є функціями просторової частоти $\vec{\rho} = (u, v, w)^T$.

Слід мати на увазі, що на практиці визначенню акустичними методами характеристик НДС заважає структурна неоднорідність матеріалу, яка може суттєво вплинути на результати вимірювань часу поширення ультразвуку. Цей вплив може бути на порядок більший, ніж вплив НДС матеріалу. Неправильна інтерпретація результатів вимірювань може призвести до значних похибок при оцінці характеристик стану об'єкту контролю. Тому були запропоновані ІТ УЗКТ, які дають можливість усунути вплив структурної неоднорідності матеріалу на відновлення компонентів тензора напружень, а також технології УЗКТ для відновлення розподілу інваріанта тензора напружень [18], які ґрунтуються на схемах збору даних у площинах, перпендикулярних до осей вибраної системи координат, і вимірюванні відносних змін часів поширення поздовжньої і двох поперечних хвиль, поляризованих вздовж осей.

На основі розроблених методів УЗКТ у ФМІ при підтримці Українського науково-технологічного центру, Цільової програми НАН України “Ресурс” та ВП “Рівненська АЕС” НАЕК України “Енергоатом” за період 1999–2009 рр. розроблено та апробовано ряд УЗ томографів для УЗК товстостієвих та циліндричних (трубопроводів) металічних виробів із зварними з'єднаннями при односторонньому доступі до зовнішньої поверхні (рис. 9) і оцінювання об'ємної однорідності властивостей металу зварних з'єднань та навколошовних областей, зокрема:

- стаціонарний УЗ томограф UST-2000 для УЗК у лабораторних умовах [24, 25];
- портативний УЗ томограф UST-04 для УЗК у промислових умовах [26, 27].

Ці томографи призначені для експериментального відновлення ПР в об'ємі матеріалу акустичних, ФМХ і параметрів неоднорідного НДС матеріалу. Вони є першими в Україні й одними з перших у світі розробок УЗ діагностичної апаратури подібного призначення. Визначення ПР ФМХ матеріалу проводиться шляхом томографічної реконструкції ПР акустичних характеристик матеріалу (швидкостей поширення і загасання різних типів УЗ хвиль), на першому етапі, та розрахунку на основі цього ПР механічних (технологічних, структурних) характе-

ристик матеріалу з використанням аналітичних або феноменологічних співвідношень між цими параметрами матеріалу, на другому етапі. Для забезпечення високої продуктивності УЗК використані розроблені у ФМІ принципи побудови методів і систем УЗКТ, які передбачають:

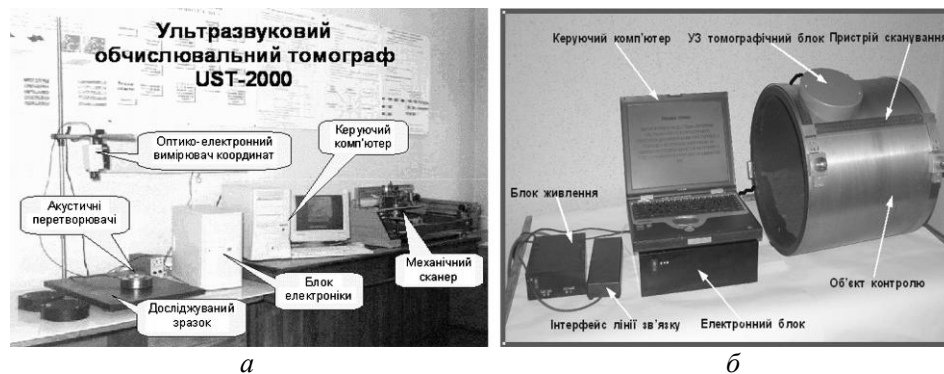


Рис. 9. Комп'ютерні томографи для ультразвукового контролю виробів: стаціонарний UST-2000 (а) та портативний UST-04М (б).

- збір даних променевими проекціями за допомогою багатоканальних УЗ випромінюючих/приймальних УЗ давачів під час сканування поверхні виробу;
- застосування операцій ОП для побудови СЗ в процесі збору даних та швидке визначення аномальних областей;
- фільтрацію проекцій СЗ без використання трудомістких процедур перетворення Фур'є чи згортки.

Основні технічні характеристики розроблених УЗ томографів:

- *зондує поле*: поздовжні, поперечні та поверхневі УЗ хвилі;
- *метод збору даних*: дзеркально-тінювий з багаторакурсним оглядом;
- *вимірювані параметри*: час поширення і амплітуда УЗ хвиль (відносна похибка вимірювання часу – менше 10^{-4} %);
- *метод обробки даних*: на принципах комп'ютерної 3D-томографії при променевій схемі збору даних;
- *реконструйовані зображення*: ортографічні (усереднені по товщині виробу); томографічні (плоскі перерізи довільної орієнтації).

Нові можливості УЗК матеріалу з допомогою розроблених томографів продемонстровані на рис. 10, на якому наведено експериментальні зображення ПР дефектів і деяких механічних характеристик матеріалу у сталевій плиті завтовшки 28 мм із V-подібним стиковим зварним з'єднанням на частоті 2,47 МГц.

Загальний вигляд робочого вікна, що відображається на екрані монітора томографа в режимі 3D-реконструкції, наведений на рис. 11. Повний кадр зображення умовно розбитий на 4 квадранти. У правому верхньому квадранті наводиться робоча інформація про зразок, умови томографічного експерименту та контрольні значення результатів сканування. У лівому верхньому квадранті відображається схематичне об'ємне зображення поля контролю зразка. Це зображення служить оператору для вибору необхідних для візуалізації 3-х взаємно ортогональних перерізів об'єму зразка (XY, XZ та YZ). Зображення реконструйованих ПР характеристик відображається відповідно у 2-х нижніх квадрантах: у лівому нижньому відображене пошарове зображення у горизонтальній площині XY, у правому нижньому – томографічні зображення у вертикальних перерізах XZ і YZ.

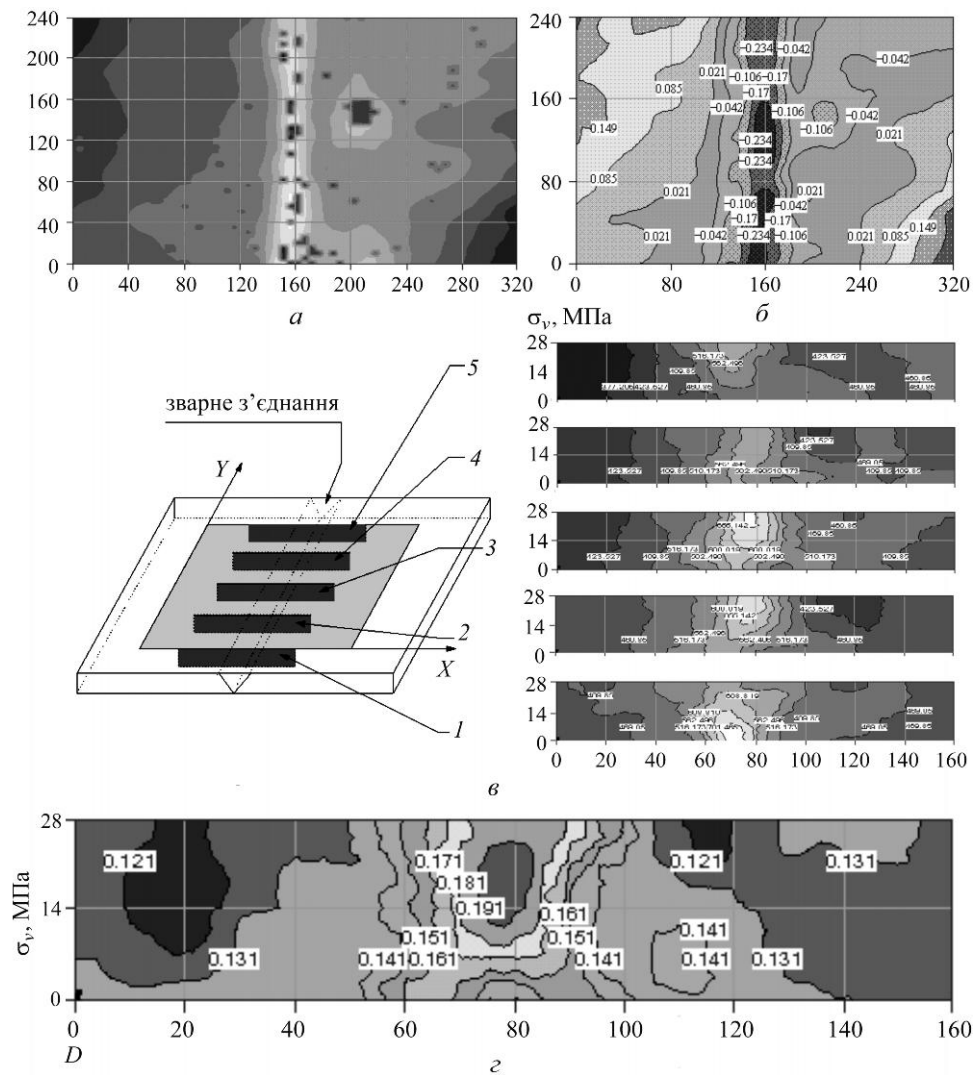


Рис. 10. Реконструйовані ортографічні (а, б) та томографічні (е, з) зображення просторових розподілів: дефектів та відносних змін модуля Юнга (δE , %) (а), модуля зсуву (δG , %) (б), границі міцності на розтяг σ_v (МПа) у вертикальних перерізах вздовж зварного шва (е): 1 – $Y=0$; 2 – 60 мм; 3 – 120 мм; 4 – 180 мм; 5 – $Y=240$ мм (е); розміра зерна D (мм) (з).

Розроблені ІТ та засоби УЗКТ здатні піднести на якісно новий рівень ТД матеріалів і відкривають широкі можливості для підвищення достовірності її результатів при оцінці залишкового ресурсу виробів. Слід зазначити декілька аспектів цього питання.

1. Технології УЗКТ спрямовані на отримання інформації про об'ємний розподіл властивостей матеріалу й ефективно вирішують задачі класифікації дефектів за формою, розмірами та локалізацією.

2. Ґрунтуючись на багатократному і багаторакурсному зондуванні об'єму виробу, технології УЗКТ значно підвищують можливості УЗК при виявленні слабконтрастних дефектів у неоднорідних за структурою і властивостями матеріалах, що особливо актуально при використанні сучасних композиційних матеріалів, у зварних з'єднаннях, чавунах і т.п.

3. Розроблені у ФМІ технології УЗКТ, які забезпечують відновлення ІР скалярних і тензорних ФМХ матеріалу, дали змогу сформулювати проблему оцінки

ПДФ стану матеріалу на основі визначення локальних градієнтів цих характеристик, передусім параметрів тензора напружень.

4. Створені УЗ комп'ютерні томографи підтвердили можливість практичної реалізації розроблених ІТ УЗКТ для вирішення задач УЗК, їх відповідність основним вимогам до приладів НК, а саме: висока продуктивність контролю, універсальність до форми виробу, висока інформативність результатів контролю.

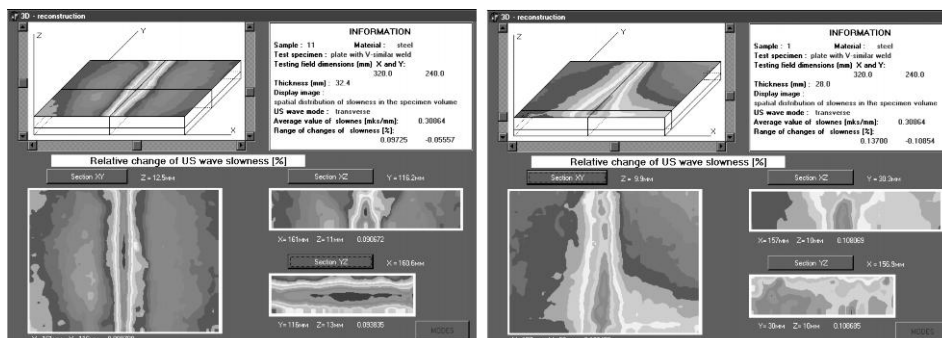


Рис. 11. Робоче вікно ультразвукових комп'ютерних томографів UST-2000 та UST-04 у режимі 3D-реконструкції.

5. Існуючі методики оцінки залишкового ресурсу виробу (конструкції) ґрунтуються на використанні інформації про наявний (виявлений) у виробі дефект, його параметри (тип, форма, розміри, розташування) і про деякі усереднені значення ФМХ матеріалу (табличні або експериментально визначені). А в реальних конструкціях, особливо в тих, що містять дестабілізуючі елементи типу зварних з'єднань, різні типи дефектів, включень, ФМХ матеріалу не є однорідними в об'ємі матеріалу, мають локальні градієнти, зокрема, і в околі існуючих дефектів. Тому сучасні методики ТД повинні враховувати цю інформацію, а отримати її експериментально дають можливість саме технології УЗКТ (рис. 10а).

Подальший розвиток технологій УЗКТ у ФМІ (2009-2014 рр.) пов'язаний із дослідженнями їх можливостей для оцінювання ступеня еволюції (деградації) стану металу в процесі експлуатації, технологічної обробки тощо. Відомо, що деградація металу, з одного боку, супроводжується накопиченням розсіяних мікропошкоджень і призводить до змін властивостей матеріалу, зародження мікротріщин, розвитку макротріщин і подальшого руйнування. З іншого, деградація матеріалу призводить до збільшення неупорядкованості ПР його ФМХ і передусім ПР його структурних характеристик, що виявляється у збільшенні статистичного розкиду, наприклад, такого параметру, як твердість. Враховуючи ці аспекти, у ФМІ запропоновано новий спосіб оцінювання ПР ступеня деградації матеріалу на основі реєстрації зворотно розсіяних структурою металу УЗ сигналів (ЗРС), застосування томографічних методів для їх обробки [27–30] і оцінювання неупорядкованості реконструйованих ТЗ.

Технології УЗКТ на основі реєстрації ЗРС (УЗКТ ЗРС) ґрунтуються насамперед на припущенні, що деградація матеріалу призводить до структурних змін, які впливають на формування ЗРС, і на їх основі будується ТЗ ПР розсіювальної здатності структури металу (на мезорівні). Для оцінювання ступеня деградації використовується міра неупорядкованості ТЗ ПР цього параметра. Для реалізації технології УЗКТ ЗРС розроблено портативний УЗ комп'ютерний томограф UST-05M (рис. 12а), який забезпечує: сканування зовнішньої поверхні товстостінних об'єктів контролю зі сталі і сплавів стандартним суміщеним або роздільно-суміщеним п'єзоперетворювачем; експериментальну реєстрацію розширеної часової реалізації ЗРС з багатократно відбитими донними сигналами у режимі *A-скан*; побудову

на основі цього ТЗ розсіювальної здатності структури металу; оцінювання алгоритмічно-програмними засобами ступеня деградації металу шляхом обчислення міри неупорядкованості реконструйованих ТЗ на основі розрахунку параметра SNR (сигнал/шум) за томографічними зображеннями; розрахунок ПР розміру зерна на основі реконструйованого ТЗ ПР розсіювальної здатності металу.

Параметр SNR визначається як

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_i \sum_j a_{ij}^2}{\sum_i \sum_j (a_{ij} - \bar{a})^2}, \quad (8)$$

де a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$) – елементи зображень, по яких проводиться сумування; $\bar{a} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}$ – середнє значення; при збільшенні ступеня деградації значення SNR зменшується.

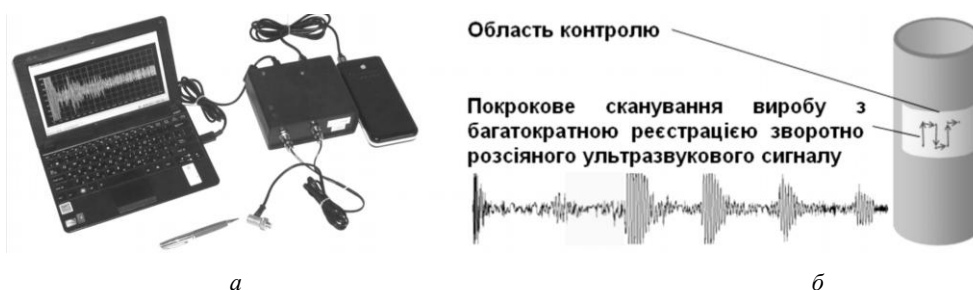


Рис. 12. Портативний ультразвуковий комп'ютерний томограф UST-05M (а) та приклад реєстрації ультразвукових сигналів типу A -scan під час сканування (б).

Томограф UST-05M може також використовуватися і в інших режимах, зокрема, як рефлектометр-товщиномір з можливістю побудови зображень типу C -scan на заданій глибині і відображення рельєфів внутрішньої поверхні (дна) виробу або прилягання бандажу; вимірник поглинання з побудовою зображень C -scan поглинання; як структуромір з можливістю побудови зображень типу C -scan ПР розміру зерна на основі еталонного або безеталонного методів; як дефектоскоп з побудовою зображень типу B -scan.

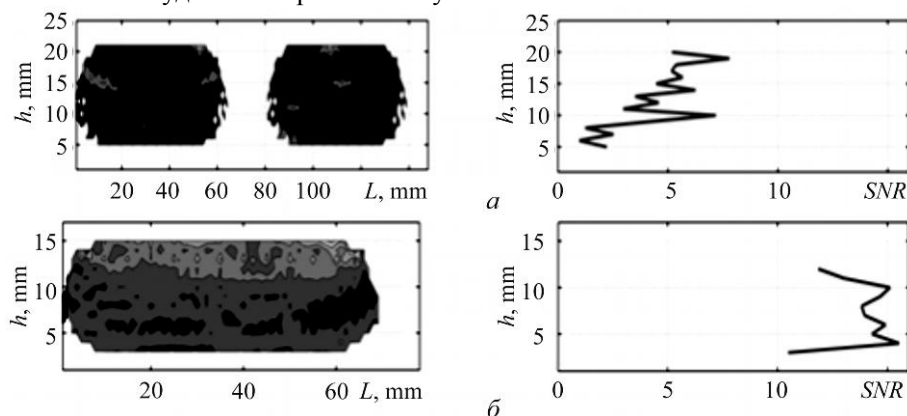


Рис. 13. Томографічні зображення розсіювальної здатності структури металу в окремих осьових перерізах по товщині трубопроводу (зліва) та розподіл параметра SNR по товщині стінки трубопроводу зі зварним з'єднанням з напрацюванням 250 тис. год (а) та для трубопроводу без напрацювання (б).

Для прикладу, на рис. 13 наведені ТЗ розсіювальної здатності структури металу в окремих осьових перерізах по товщині трубопроводу (зліва) та співвідношення сигнал/шум (параметр SNR), обчислені в цих зображеннях вздовж ліній, рівновіддалених від осі циліндра на різних глибинах, для трубопроводу живильної води зі зварним з'єднанням з напрацюванням 250 тис. год (рис. 13а) (Рівненська АЕС) та для такого ж трубопроводу без напрацювання (рис. 13б).

Експерименти підтвердили, що для трубопроводу з напрацюванням 250 тис. год значення параметра SNR лежать в межах 2...6 (великий «шум») і змінюються з товщиною. Це свідчить про нерівномірність деградаційних процесів по товщині трубопроводу. Для трубопроводу без напрацювання значення параметра SNR лежать в межах 12...16 (малий «шум») і значно менше змінюються по товщині.

Декаметровая радіоастрономія. *Класичний підхід до відновлення зображень у радіоінтерферометрії.* Класичний метод відновлення зображення в радіоастрономії засобами інтерферометрії ґрунтується на використанні теореми Ван Ціттерта–Черніке [31]. У першому наближенні ця теорема пов'язує перетворенням Фур'є шуканий кутовий розподіл радіояскравості джерела $I(\xi, \eta)$ з поперечною кореляційною функцією (функцією взаємної когерентності) $B_{\perp}(D)$, що реєструється інтерферометром.

Така техніка ВНЗ має два суттєві обмеження. По-перше, теорема Ван Ціттерта–Черніке вимагає використання квазімонохроматичного наближення. Тому ширина смуги реєстрованого сигналу повинна бути значно меншою, ніж центральна частота прийому інтерферометра. Використання широкої смуги в цьому випадку призводить до радіального розмиття відновлюваного зображення або вимагає розділення смуги прийому на декілька діапазонів та індивідуальної обробки в кожному із діапазонів. По-друге, використання перетворення Фур'є для ВНЗ вимагає вимірювання фази функції видності.

Водночас, у декаметровій (ДКМ) інтерферометрії (10 - 30 МГц) впевнено реєструється лише амплітуда функції видності, а фаза значно спотворена через наявність активного середовища поширення. В цьому частотному діапазоні фазові вимірювання при інтерферометричних спостереженнях практично виключені завдяки впливу іоносфери – т. зв. “фазова проблема” [31]. Можна відмітити ряд ефектів впливу іоносфери на поширення радіохвиль [32]: іоносферний ефект Фарадея, групова затримка, додатковий шлях, зміна фази, фазова нестабільність, загасання (в D - і F - областях), рефракція. Існують методи, які дають змогу обійти цю проблему, проте застосовні вони, в основному, на високих радіочастотах: метод замкнутих фаз, метод точкового джерела, метод Лабейрі (спекл-інтерферометрія), метод перетворення Гільберта, метод інтегральних рівнянь, метод системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, метод оптимального рішення, алгоритм Фіанупа, алгоритм Герберт–Саксона, метод максимальної ентропії, оптимізаційні (нелінійні) методи, адаптивні методи, методи Кальманівської фільтрації та інші [31]. Однак ці методи не завжди є ефективними на низьких частотах (у декаметровому діапазоні).

Запропонований у ФМІ підхід до формування радіозображення на основі томографічної процедури [32, 33] ґрунтується на науковому доробку, який напруцьовувався учнями і послідовниками В. М. Михайловського в галузі томографії, починаючи із запропонованих технологій для вирішенні задач геоакустики. Після створення і введення в експлуатацію у 1991 р. на ШЕБ ФМІ радіотелескопа УРАН-3 в складі системи українських ДКМ радіоінтерферометрів з наддовгою базою (РНДБ) УРАН для вирішення проблеми ВНЗ космічних радіоджерел при високому рівні завад (включаючи вплив іоносфери) і був запропонований томографічний підхід. Технологія КТ вирішує проблему формування зображення об'єкта на основі його проєкцій [12].

Процедуру ВНЗ космічних радіоджерел при інтерферометричних спостереженнях можна зобразити як послідовність збору даних (пряме перетворення Радона) з подальшим зворотним перетворенням. Проте в цьому випадку вимірюваним параметром при інтерферометричних спостереженнях повинна бути не поперечна кореляційна функція, як звичайно [12], а поздовжня кореляційна функція (ПКФ).

На рис. 14а наведена спрощена схема радіоінтерферометра з двох антен А і Б для найпростішого (плоского) випадку, виділені елементарні площадки X і Y радіоджерела та формула кореляційного відгуку інтерферометра. Часова затримка $\tau = D \sin(\varphi)$ між сигналами, прийнятими антенами А та Б, однозначно визначається кутовими координатами цих елементів. Припускаючи, що всі елементи джерела мають ідентичний спектр і їх радіовипромінювання є δ -корельованим, справедлива така теорема: ПКФ $R_{AB}(\tau)$ визначається як згортка нормованої авто-кореляційної функції $r(\tau)$ випромінювання радіоджерела з функцією кутового розподілу радіояскравості $f(\tau)$. При переході від випадку широкої смуги прийому до квазімонохроматичного наближення ця теорема вироджується в класичну теорему Ван Ціттерта–Церніке. Таким чином, розв'язок рівняння згортки призводить до розв'язку оберненої задачі відновлення кутового розподілу інтенсивності радіовипромінювання для певного годинного кута на основі ПКФ.

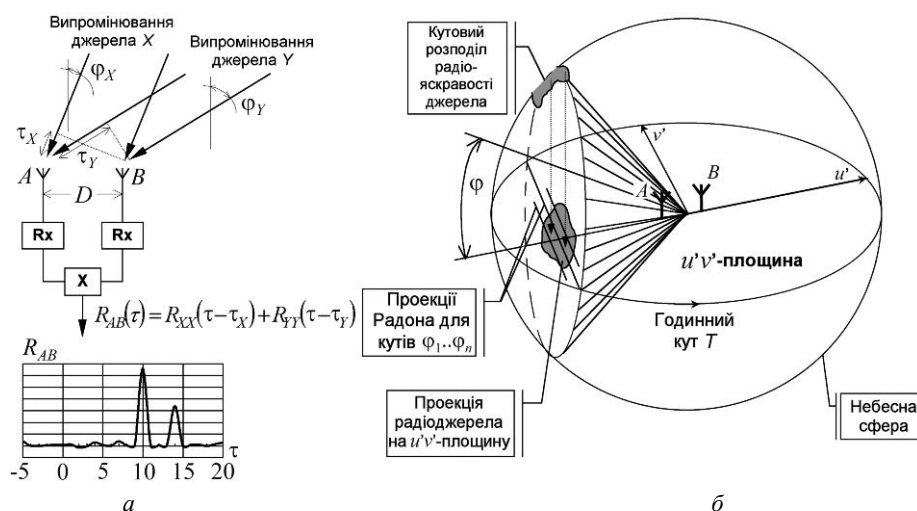


Рис. 14. Кореляційний відгук АВ-інтерферометра (а) та схематичне зображення процесу отримання томографічних проєкцій в радіоінтерферометрії (б).

Рис. 14б відображає запропоновану томографічну процедуру відновлення зображення у випадку реальних інтерферометричних спостережень. На рисунку зображено небесну сферу та конус. Вісь конуса лежить на продовженні вектора бази інтерферометра АВ. Точки однакової затримки лежать на перетині конуса з небесною сферою і утворюють коло. При обертанні Землі вектор бази інтерферометра описує коло на $u'v'$ -площині. Розглянемо проєкцію небесної сфери на $u'v'$ -площину. Тоді проєкцією кола, утвореного перетином конуса з небесною сферою, буде пряма, яку можна розглядати як проєкцію Радона для радіальних елементів, розміщених під певним кутом φ . Інші конуси, що відповідають різним кутам $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ і часовим затримкам τ_1, \dots, τ_n , формують набір паралельних прямих ліній.

Отже, для певного годинного кута (моменту часу) за допомогою ПКФ можна визначити набір паралельних проєкцій кутового розподілу радіояскравості небесної сфери (радіоджерела) на $u'v'$ -площину. Тоді, за рахунок обертання Землі протягом 12 год, можна отримати повний набір паралельних проєкцій розподілу радіояскравості на $u'v'$ -площину. Така інформація є достатньою для формування

зображення шляхом зворотного перетворення Радона. Так досліджувана проблема зв'язана до класичної томографічної задачі, яка може бути вирішеною багатьма класичними методами.

Процес відбору та обробки інформації при реалізації запропонованого методу на основі ПКФ проілюстровано на рис. 15. Відповідна ІТ КТ містить такі кроки: *реєстрація ПКФ; визначення набору паралельних проєкцій на основі рівняння згортки; отримання набору проєкційних даних для різних годинних кутів за рахунок обертання Землі; відновлення зображення джерела в $u'v'$ -площині шляхом зворотного перетворення Радона; формування кутового розподілу радіояскравості джерела шляхом зворотного геометричного проєктування $u'v'$ -зображення.*

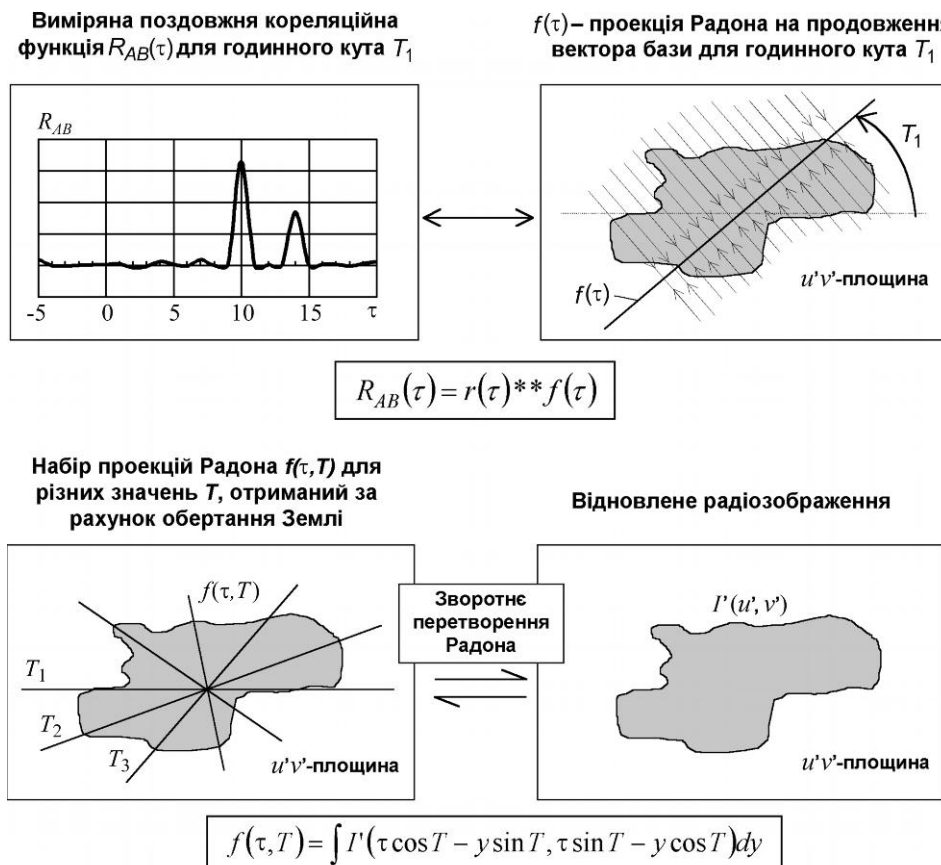


Рис. 15. Процедура відновлення радіозображень з використанням томографічного підходу в радіоінтерферометрії.

Запропонована ІТ повинна бути особливо ефективною при застосуванні у ДКМ радіоінтерферометрії, зокрема в РНДБ УРАН. Основні переваги томографічного підходу такі: відсутність необхідності у фазових вимірюваннях; реальна можливість використання широкої смуги приймального каналу, що, в свою чергу, підвищує чутливість інтерферометра; збільшення ширини смуги компенсує недостатність густини заповнення простору баз декаметровими антенами.

Отже, запропонований у ФМІ томографічний підхід до формування радіозображень космічних джерел на основі вимірювань ПКФ при інтерферометричних спостереженнях дав змогу вперше реалізувати процедуру ВНЗ космічних радіоджерел у ДКМ радіодіапазоні лише на основі амплітудних вимірювань (немає необхідності у фазових вимірюваннях). Цей підхід є значно інформативніший, ніж застосовуваний у даний час метод підбору моделей [34], який використову-

ють для побудови моделей кутової структури ДКМ радіовипромінювання космічних радіоджерел і практикують, зокрема, в дослідженнях на базі радіоінтерферометрів УРАН.

ВИСНОВКИ

Дослідження з наукової проблеми відновлення зображень у неоптичних діапазонах хвиль (ВНЗ) започаткував у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України чл.-кор. НАН України В. М. Михайловський в кінці 50-х років минулого століття, а його учні та послідовники розвивають цей напрям досліджень і в наш час, використовуючи прогресивні інформаційні технології і сучасну комп'ютерну техніку.

Розвиток досліджень з проблеми ВНЗ у ФМІ НАН України за цей період охопив такі прикладні галузі, як геоакустика (пошук рудних тіл), гідроакустика (пошук об'єктів спеціального призначення у водному середовищі), випробувальна техніка (управління акустичними випробуваннями виробів авіаційної техніки), ультразвуковий контроль (контроль дефектності та переддефектного стану матеріалу), декаметрова радіоастрономія (побудова радіозображень кутової структури радіовипромінювання космічних джерел).

В теоретичному плані цей напрям досліджень у ФМІ пройшов шлях від використання проективної геометрії у процесі побудови контурів рудних тіл на основі зареєстрованих при їх прозвучуванні частотно-селективних акустичних тіней, через застосування інформаційної моделі кодування-декодування для синтезу систем ВНЗ в гідроакустичних дослідженнях і випробувальній техніці, до розробки сучасних алгоритмічно-програмних і комп'ютеризованих технічних засобів для реконструкції томографічних зображень дефектів, властивостей неоднорідних середовищ і кутової структури радіовипромінювання космічних радіоджерел у задачах ультразвукового контролю і декаметрової радіоастрономії.

1. Михайловський В. Н., Первушин В. Н. Звукометрические методы внутрирудничной макродефектоскопии. – К.: Наук. думка, 1968. – 182 с.
2. Кошевой В. В., Первушин В. Н. Широкополосный излучатель упругих колебаний // Геофизическая аппаратура. – Ленинград: Недра, 1969. – Вып. 41. – С. 89–97.
3. Кошевой В. В., Михайловский В. Н., Первушин В. Н. К методике оконтуривания неоднородностей горных пород акустическими методами // Вопросы прикладной акустики и вибрационной техники. – К.: Наук. думка, 1966. – С. 77–84.
4. Кошевой В. В., Первушин В. Н. Моделирование метода гидроакустического прозвучивания // Теория и элементы отбора геофизической информации. – К.: Наук. думка, 1965. – С. 129–137.
5. Экспериментальная проверка звукометрических методов рудничной макродефектоскопии / Я. Е. Бельский, Л. М. Громов, В. В. Кошевой, В. Н. Михайловский, В. Н. Первушин // Отбор и передача информации. – К.: Наук. думка, 1969. – Вып. 19. – С. 7–12.
6. Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten // Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften. – Leipzig, 1917. – Bande 29. – S. 262–277.
7. Бельский Я. Е., Кошевой В. В. Системы пространственно-временного преобразования информации. – К.: Наук. думка, 1979. – 251 с.
8. Алехина Л. В., Кошевой В. В., Сорока С. А. Информационные аспекты процесса восстановления акустических изображений // Тр. УП Всесоюз. конф. по информационной акустике. – М., 1982. – С. 128–130.
9. Кошевой В. В., Сорока С. А. Твердая акустическая линза в звукооптической системе // Отбор и передача информации. – К.: Наук. думка, 1977. – Вып. 51. – С. 44–53.
10. Кошевой В. В., Сорока С. А. Цифровое восстановление акустических изображений // Акустические методы исследования океана. Секция судовой акустики. – Ленинград: Судостроение, 1976. – Вып. 237. – С. 89–99.
11. Кошевой В. В. Применение методов голографии в акустической испытательной технике // Проблемы микроволновой голографии. – М.: МИРЭА, 1979. – С. 13–23.
12. Kak A. C., Slaney M. Principles of Computerized Tomographic Imaging // IEEE Press. – 1988. – 322 p.
13. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д. Томография ионосферы. – М.: Наука, 1991. – 176 с.

14. Кошовий В. В., Кривін С. В., Романишин І. М. Ультразвукова обчислювальна томографія в задачах неруйнівного контролю і технічної діагностики // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – № 5. – С. 31–42.
15. Koshovyy V. V., Krivin Ye. V. Romanyshyn I. M. Ultrasonic Tomographic Non-Destructive Techniques for Material Characterisation // 7th European Conf. on Nondestructive Testing. – Copenhagen, 26–29 May, 1998. Proc. – P. 2505–2512.
16. Кошевой В. В., Кривин Д.Е., Кривин Е.В. Томография листовых изделий // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 20–27.
17. Ultrasonic tomography technologies for NTD and monitoring of material degradation / V. V. Koshovyy, Z. T. Nasarchuk, Ye. V. Krivin, I. M. Romanyshyn // Proc. of Joint IAEA Specialists Meeting on NTD Methods for Monitoring Degradation. – Petten, the Netherlands, 1999. – P. 79–88.
18. Кошовий В. В., Кривін С. В. Ультразвукова комп'ютерна томографія в неруйнівному контролі // Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – С. 515–538.
19. Кошовий В. В., Назарчук З. Т. Про оцінку переддефектного стану матеріалу засобами ультразвукової обчислювальної томографії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – Львів. Вип. 2. – 2001. – С. 118–132.
20. Панин В. Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Изв. вузов. Физика. – 1998. – № 1. – С. 7–34.
21. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Введение в акустоупругость. – К.: Наук. думка, 1977. – 152 с.
22. Никитина Н. Е. Влияние собственной анизотропии материала на точность измерения напряжений методом акустоупругости // Дефектоскопия. – 1996. – № 8. – С. 77–81.
23. Tomography of sheet products // 2nd Int. Conf. on Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics / V. Koshovyy, D. Krivin, E. Krivin, I. Romanyshyn. – Minsk, 20–23 October 1998. – Proc. – P. 201–207.
24. Koshovyy V. V., Krivin Ye. V. Romanyshyn I. M. Ultrasonic Tomographic Non-Destructive Techniques for Material Characterisation / 7th European Conf. on NDT, Copenhagen 26–29 May, 1998. – P. 2505–2512.
25. Ultrasonic Computerized Tomography in Material Technical Diagnostics / V. Koshovyy, Ye. Krivin, Z. Nasarchuk, I. Romanyshyn // 15th World Conf. on NDT, Roma 2000. CD Proc. – 4 p.
26. Розроблення технологій ультразвукової томографії для технічної діагностики конструкційних матеріалів / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, О. М. Мокрий, Р. І. Романишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – № 2. – С. 109–116.
27. Оцінювання ступеня експлуатаційної деградації металу товстостінних трубопроводів АЕС засобами ультразвукової комп'ютерної томографії / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, Р. В. Шарамага, М. А. Шама // 36. наук. статей. Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 278–284.
28. Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала. Ч. 1 / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамага // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 37–42.
29. Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала. Ч. 2 / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамага // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010.
30. Оценка деградации в объеме материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамага // Дефектоскопия. – 2010. – № 9.
31. Image Formation From Coherence Functions in Astronomy / Eds.: Cornelis Van Schooneveld, Leiden Observatory, Leiden, The Netherlands, D. Reidel. – Publishing Company, 1978. – 317 p.
32. Koshovyy V. V., Lozynsky A. B. The tomographic technique for reconstruction of the cosmic radio sources images on the basis of radiointerferometric data / XXVIIth General Assembly of the Int. Union of Radio Science. August 17–24, 2002, Maastricht – Materials, P0695.
33. Кошовий В. В., Лозинський А. Б. Уран: Дослідження космічного простору із застосуванням сучасних інформаційних технологій // Відбір і обробка інформації – 2003. – Вип. 19 (95). – С. 10–15.
34. Угловая структура квазара 3C47 в декаметровом диапазоне волн / А. Б. Лозинский, Р. А. Лозинский, О. Л. Ивантишин и др. – Odessa Astronomical Publication. – 2011. – Vol. 24. – С. 103–105.