
doi

УДК 620.179

О.О. Огір, аспірантка

Інститут проблем моделювання в енергетиці

ім. Г.Є. Пухова НАН України

(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. 4242296, e-mail: lenaogir@gmail.com)

Метод підвищення якості реконструкції діагностичних зображень на основі інтегральних перетворень

Розроблено обчислювальний метод на основі процедури фільтрації ревербераційних сигналів-завад і вторинних дифракційних максимумів Фур'є-перетворення, що дозволяє покращити просторову роздільну здатність відтворених діагностичних зображень більше ніж у шість раз. Метод може бути застосований у медичній діагностиці для ефективного виявлення низькоконтрастних новоутворень на початковій стадії розвитку та в задачах неруйнівного контролю для виявлення найдрібніших дефектів матеріалів і середовищ (в галузі будівництва, енергетики та паливної промисловості).

К л ю ч о в і с л о в а: реконструкція, сигнали-завади, фільтрація, просторова роздільна здатність, ехосигнал, голограма.

Достовірна інтерпретація зображень тісно пов'язана з якістю представлення досить дрібних неспотворених деталей. Обробка зображень є багатоплановим завданням, куди включено вирішення задач фільтрації шумів, геометричної корекції, градаційної корекції, посилення локальних контрастів, різкості, відновлення зображень тощо. Сучасні методи отримання цифрового зображення, здебільшого, засновані на апаратних засобах з використанням різних методів перетворення. Інформаційні технології у діагностиці вимагають спеціалізованого програмного забезпечення, що поєднує мультимодальну візуалізацію з методами цифрової обробки зображень.

Основою для досліджень в цій області є роботи Х. Гюйгенса, О. Френеля, Р. Кіргхофа, А. Релея, А. Зоммерфельда та інших вчених, які створили скалярну теорію дифракції хвиль, що дає надзвичайно точні результати при моделюванні процесів поширення акустичних хвиль. Комп'ютерні цифрові моделі фізичних голограм мають властиві тільки їм якості, а саме можливість застосування алгоритмічної обробки на всіх стадіях фор-

© Огір О.О., 2017

мування звукової голограми та реконструкції голограмних зображень. Однак в даний час практично відсутній системний аналіз процесів реєстрації звукової голограми, формування її дискретної математичної моделі, а також ефективні комп'ютерні методи реконструкції голограмних акустичних зображень з високим просторовим і контрастним розрізненням.

В ході дослідження проведено всебічний аналіз процесів формування та реконструкції діагностичних зображень в існуючих системах, визначено фактори, що впливають на якість та точність реконструкції діагностичних зображень. Отже, до основних факторів, що впливають на якість та точність реконструкції діагностичних зображень можна віднести наступні:

недостатньо висока поперечна просторова розрізнявальна здатність, що визначається фізичними параметрами звукового променя;

низька точність відтворення інтенсивності ехосигналів фокусованих точок об'єкту в пікселях зображення, яка є обмеженою внаслідок дії сигналів-завад ревербераційної і нормальної природи;

погіршення повздовжньої та поперечної розрізнявальної здатності через флуктуації тривалості та амплітуди сумарного ехосигналу; ці флуктуації визначаються зміненням форми фронтів ехосигналів при розповсюдженні в досліджуваному середовищі.

Зважаючи на це, актуальною є розробка ефективного обчислювального методу реконструкції акустичних зображень об'єкта чи середовища, що відповідає таким вимогам:

швидкодія, що забезпечує виконання обчислювальних процедур в темпі реального часу розповсюдження відбитої звукової хвилі;

сталість до похибок вимірювання і апроксимації даних голограми;

висока чутливість до ехосигналів сфокусованих точок в присутності сильних сигналів-завад;

можливість фільтрації акустичного зображення від впливу вторинних дифракційних максимумів Фур'є, тобто перетворення сигналів-завад ревербераційного типу;

високе просторове та контрастне розрізнення при відтворенні точок об'єкта в акустичному зображенні.

Зазначені властивості обчислювального методу реконструкції діагностичних зображень в цілому складають інформаційний показник якості реконструкції ультразвукових (УЗ) зображень.

Просторове (поперечне) розрізнення в системах дефектоскопії визначається розмірами поперечного перетину звукового променя на різному віддаленні від вимірювальної ґратки, і акустичне зображення точкового об'єкту на різних глибинах зондування формується у вигляді зерен різних розмірів та різної яскравості, як з елементів мозаїки. Причиною цього є

різні розміри поперечного перетину звукового променя на різних глибинах зондування, змінення форми зондуючого звукового сигналу і ехосигналів при розповсюдженні внаслідок затухання більш високочастотних компонент Фур'є-спектра ехосигналів. При цьому амплітуда обвідної ехосигнала буде флюктувати і вносити сигнали-завади в формоване діагностичне зображення.

Слід зазначити, що досить складно забезпечити необхідний рівень адекватності інформації, реєстрованої з різних послідовних точок синтезованої апертури для всіх точок дефекту, розташованого в сканованому шарі матеріалу. Теоретично зондування повинно здійснюватись плоскою зондуючою хвилею для всіх точок дефекту з синхронізацією процесу опромінення дефекту з різних точок синтезованої апертури. Оскільки при кожному зондуванні здійснюється тільки одне вимірювання амплітуди і фази ехосигналу в заданому шарі матеріалу (по часу затримки приходу ехосигналу), в такій системі якість зображення визначається обмеженнями амплітудної голографії, що є досить впливовими і можуть визначати лише зовнішні контури дефекту в досить розмитому (не сфокусованому) вигляді.

Фазована ґратка (ФГ) — це п'єзоперетворювач, що складається з декількох (або декількох десятків) окремо керованих випромінювачів і широко застосовується при вирішенні складних задач контролю, проте в Україні практично не використовується. Шведські спеціалісти використовують лінійну ФГ в системі УЗ контролю мідних сховищ відпрацьованого ядерного палива з товщиною стінки 90 мм. Контролюється зварний шов між корпусом та кришкою, виконаний електронно-променевим зварюванням. Основний кут нахилу та переміщення перетворювача здійснюється механічним способом, а ФГ здійснює швидке сканування. Ґратка має 64 елементи, частота зондування — 3,5 МГц. Мідь має значну анізотропію та значне розсіяння ультразвуку. Для зростання відношення сигнал-завада за допомогою ФГ здійснюють фокусування на заданій глибині зондування, а також нелінійну цифрову фільтрацію одержуваних акустичних зображень.

У США розроблено самофокусуючу ФГ для контролю листової сталі хвилями Релея і Лемба. Центральний елемент ґратки випромінює, а всі елементи приймають імпульс від неоднорідності (дефекту), де бажано одержати фокусування. З урахуванням часу пробігу імпульсів, форм і розмірів ґратки автоматично обчислюються і вводяться часові затримки для всіх її елементів.

Питання контролю зварних швів в сталевих конструкціях також є актуальним і висвітлюється в матеріалах сьомої Європейської міжнародної конференції. У доповіді фінських спеціалістів повідомляється про УЗ

метод для виявлення сітки малих тріщин в аустенітних швах товщиною 28 мм. Установка має сканер з синтезованою апертурою, що дозволяє збільшити відношення корисного сигналу до рівня структурних завад до 20 мм. На конференції обговорювались питання про використання комп'ютерної техніки для вдосконалення неруйнівного контролю. Згадані цифрові методи (акустична голографія і синтезована апертура) базовані на використанні спеціалізованих та універсальних комп'ютерів.

В доповіді шведських спеціалістів запропоновано спосіб підвищення відношення сигнал/завада. Ними введено поняття «ентропія», яке в даному контексті є близьким до поняття «інформація». Ентропія сигналів, відбитих від дефекту, є більшою, ніж ентропія шуму. Різниця визначається фазою і частотним спектром сигналів. В частотному спектрі корисних сигналів значно більше високочастотних компонент. Змінюючи частотну полосу приймача, виділяють корисний сигнал [2, 3]. Спосіб по своїй суті близький до методу оптимальної фільтрації. Використовується також синхронне детектування з відомою початковою фазою опорного сигналу. В результаті використання запропонованого способу відношення сигнал/завада покращується приблизно в 1,5 рази.

УЗ когерентні методи досить широко застосовуються при контролі устаткування АЕС. У роботі [2] описано запроповану і реалізовану комплексну технологію аналізу стану якості зварних швів з застосуванням розроблених систем з когерентною обробкою сигналів. Сутність її полягає в наступному.

1. На першому етапі здійснюється УЗ контроль за методиками і нормами, діючими в даній галузі. Це може бути ручний контроль з використанням УЗ системи в обзорному (пошуковому) режимі. На цьому етапі вирішується задача виявлення зон, підозрілих на присутність дефектів. Вихідними параметрами контролю є амплітуда сигналу, який розсіюється в результаті відбиття від досліджуваної неоднорідності, а також умовні параметри неоднорідності і придатності зварного з'єднання згідно діючих норм.

2. На другому етапі в зонах, де виявлені дефекти, вищі за пошуковий або контрольований рівень, здійснюється експертний контроль системою АВГУР [5]. В цьому режимі детально реєструється поле дефекту. Потім ці дані обробляються та аналізуються екпертом. Основна задача — виявлення дійсних параметрів дефектів, висоти, довжини, координат залягання. Інформація про параметри дефектів передаються спеціалістам з міцності.

3. На третьому етапі спеціалісти з міцності виконують розрахунки по виявленню ресурсу зварного з'єднання з використанням даних про дійсні параметри дефектів, які отримали при виконанні другого етапу. За резуль-

татами розрахунків міцності приймають рішення про доцільність ремонту шва. У випадку, коли зварне з'єднання допущено в експлуатацію, воно підлягає обов'язковому повторному експертному контролю.

4. На четвертому етапі після встановлення спеціалістами з міцності строку придатності виконується повторний експертний контроль.

Слід зазначити, що в системах з когерентною обробкою амплітуда УЗ сигналу не є визначальним вимірювальним параметром, оскільки характеристики зображень, за якими визначаються параметри дефектів, не суттєво залежать від амплітуди зареєстрованих сигналів внаслідок того, що більше 70% інформації про дефект міститься в їх фазі. Саме ця якість надзвичайно цінна при використанні таких систем для кількісного аналізу дефектів зварних з'єднань.

Розрізняльна здатність систем з когерентною обробкою даних є одним з найважливіших параметрів, що характеризують апертуру, яку використовуємо для реалізації розглянутої вище технології контролю. Вона визначається практичною розрізняльною здатністю контрольної апаратури. Як відомо, розрізняльна здатність зображень дефектів для систем, які використовують когерентну обробку даних, є наступною: для фронтального розрізнення — $\Delta x = \lambda / 2A$; для повздовжнього розрізнення — $\Delta z = \lambda / 2A^2$, де λ — довжина УЗ хвилі; A — вимірювальна апертура.

За результатами проведеного дослідження розроблено обчислювальний метод реконструкції діагностичних зображень з високим розрізненням. Обчислювальний метод реконструкції растрових голограмних зображень, в яких кожна точка растрової лінії (акустичної осі звукового променя) відтворюється на основі одновимірної голограми, реєстрованої для означеного просторового положення звукового імпульсу в звуковому промені. Відтворювані послідовно точки компонуються в растрову лінію, растрові лінії — в кадр акустичного зображення. Відтворення інтенсивності точки растрової лінії здійснюється на основі перетворення Френеля—Фур'є [1, 3, 4]. При цьому виконуються дві основні операції:

1) лінеаризація одновимірної голограми за допомогою покомпонентного множення її на множник, спряжений квадратичному фазовому множнику Френеля; спектр лінеаризованої голограми складається з просторових гармонік з частотами $x_1 / \lambda z$, які взаємно однозначно відповідають точкам осі x_1 , де діють ехосигнали точок неоднорідностей звукового імпульсу;

2) операція оберненого Фур'є-перетворення лінеаризованої голограми, що дозволяє отримати комплексну амплітуду і частоту просторових гармонік спектра звукової голограми.

Оскільки на основі одновимірної голограми растровий обчислювальний метод відтворює лише одну просторову гармоніку спектра, яка має

нульову частоту $f_{x_0} = x_0 / \lambda z$, виконується лише операція знаходження сталої складової спектра одномірної голограми через підсумовування її комплексних компонент.

Потрібно зазначити, що у методах оберненого хвильового фронту (ОХФ) та кореляційно-фільтрового (КФ), у яких для знаходження інтенсивності і місцеположення ехосигналів точок-неоднорідностей використовуються кореляційні піки, якісне визначення точок можливе тільки при широкополосній дискретній голограмі. У розробленому обчислювальному методі присутня стала складова спектру лінеаризованої голограми, де інтервал дискретизації може бути обрано тільки за умови достатньо високого пікового значення інтенсивності сигналу сфокусованої точки. Отже, розроблений обчислювальний метод потребує кількості точок дискретизації апертури і відповідного обсягу вимірювально-обчислювальної апаратури у шість-сім разів менше, ніж метод ОХФ або КФ при досягненні просторового розрізнення одного і того ж значення [7, 8].

Оскільки в обчислювальному методі інформацією голограм для відтворення інтенсивності (амплітуди) ехосигналу у фокусованій точці є його стала складова, метод допускає використання обчислювальних процедур фільтрації сигналів-завад ревербераційного типу і вторинних дифракційних максимумів [6].

Проведені дослідження дозволили довести ефективність використання процедури фільтрації сигналів-завад і вторинних дифракційних максимумів на основі операції «WINDOWING» з використанням фільтра Дольфа—Чебишова. В цілому метод формування діагностичних УЗ зображень полягає в наступному:

1. Реєстрація одновимірних фазових (амплітудно-фазових голограмних описів точок-неоднорідностей в звуковому імпульсі на глибині зондування H .

2. Лінеаризація одновимірної голограми через покомпонентне множення її на множник, спряжений квадратичному фазовому множнику Френеля.

3. Виконання проміжної операції фільтрації даних лінеаризованої голограми від вторинних максимумів Фур'є-перетворення і сигналів-завад ревербераційного типу, які впливають негативно на просторове розрізнення і точність відтворення сигналів в точках растрових ліній. Фільтрація здійснюється на основі реалізації дії «WINDOWING» з використанням фільтра «CHEBWIN» Дольфа—Чебишова.

4. Відтворення амплітуд ехосигналів в точках растрової лінії шляхом виконання операції оберненого Фур'є-перетворення функції, одержаної в результаті виконання операції фільтрації. Інтенсивність пікселів зобра-

ження одержують перемноженням комплексної амплітуди на спряжене їй значення.

5. Компонування відтворених значень інтенсивності пікселів зображення в растрову лінію, растрових ліній в кадр голограмного двовимірного зображення вертикального перетину досліджуваного середовища (об'єкта) [7].

Одновимірне подання в математичній моделі фазової голограми тривимірного положення точок-неоднорідностей у вигляді проекції їх геометричного положення у звуковому імпульсі на вісь X_1 не спотворює відтворених в системі амплітуд (інтенсивностей) коливань ехосигналів. Інтегральна модель двовимірної звукової голограми має вигляд

$$U(x_0, y_0) \frac{1}{j\lambda} \frac{z}{z^2 + x_0^2 + y_0^2} e^{jKz} e^{\frac{jK}{2c}(x_0^2 + y_0^2)} \times \\ \times \int_{x_1} \int_{y_1} U(x_1, y_1) e^{\frac{jk}{2z}(x_1^2 + y_1^2)} e^{-\frac{jk}{z}(x_0 x_1 + y_0 y_1)} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

де x_1, y_1 — координати точок-неоднорідностей в об'єктній площині; x_0, y_0 — координати точок реєстрованої голограми в площині голографування; $U(x_1, y_1)$ — сигнали точкоподібних джерел об'єктної площини; $U(x_0, y_0)$ — сигнали, що реєструються в площині голограми; z — відстань між об'єктною площиною і площиною реєстрації; K — хвильове число, $K = 2\pi / \lambda$.

При реєстрації одновимірної голограми лінійною ФГ значення координати y в (1) стає рівним нулю, а з урахуванням одновимірних представлень точок-неоднорідностей в об'ємі звукового імпульсу реконструкцію зображення об'єктної площини можна апроксимувати реконструкцією її точок — геометричних проекцій на вісь x_1 , колінеарною з віссю x_0 в площині голограми [5]. Враховуючи це, рівняння (1) можна записати у вигляді

$$U(x_0) = \frac{1}{j\lambda} \frac{z}{z^2 + x_0^2} e^{jKz} e^{\frac{jKx_0^2}{2c}} \int_{x_1} U(x_1) e^{\frac{jk}{2z}x_1^2} e^{-\frac{jk}{z}x_0 x_1} dx_1, \quad (2)$$

де $\frac{z}{z^2 + x_0^2}$ — значення коефіцієнта, що враховує затухання відображеної

звукової хвилі при розповсюдженні від звукового імпульсу до ехоприймачів ФГ з координатами z, x_0 ; множник $(1/j\lambda) e^{jKz}$ є постійною величи-

ною для глибини z . У виразі (2) квадратичний фазовий множник $e^{\frac{jKx_0^2}{2c}}$ можна

відкинути, якщо відновлюється тільки амплітуда коливань в об'єктній площині на лінії x_1 . У підінтегральному виразі шуканими є комплексні величини $U(x_1)$, помножені на фокусуєчий множник Френеля $e^{\frac{jk}{2z}x_1^2}$.

Фур'є-перетворення одновимірної функції $U(x_1) e^{\frac{jk}{2z}x_1^2}$, помножене на відповідний коефіцієнт, є одновимірною звуковою голограмою проєкцій точкових джерел на вісь x_1 , розташованих в об'єктній площині. У дискретній формі інтегральне рівняння (2) має вигляд

$$U(x_0) = A \sum_{i=1}^n U(x_{1i}) e^{\frac{j\pi}{\lambda z}x_{1i}^2} e^{\frac{j2\pi}{\lambda z}x_{1i}x_{0i}}, \quad (3)$$

де A є постійною величиною для координати x_0, z .

$$A = \frac{z}{z^2 + x_0^2} \frac{1}{j\lambda} e^{jkz}.$$

Якщо припустити, що масштаби осей x_0 та x_1 однакові, тобто $x_{0i} = x_{1i}$, то комплексна амплітуда, яка реєструється уздовж осі x_0 і в точках апертури x_0 , представлятиме дискретну звукову голограму згідно дискретної математичної моделі (2). Враховуючи, що просторова частота f_{x_0} дорівнює $x_0 / \lambda H$, а

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}, \quad (4)$$

можна показати, що одновимірній голограмі (4) взаємно однозначно відповідає вираз, який визначає через зворотне перетворення Френеля—Фур'є значення об'єктної функції $U(x_1)$ за отриманими значеннями $U(x_0)$.

Одновимірний аналог значень відновленої функції зображення об'єкта запишемо у вигляді

$$U(x_1) = e^{-j\omega x_1^2} \frac{j\lambda(z^2 + x_0^2)^2}{z} \int_{f_{x_0}} \left[U(f_{x_0}) e^{-\frac{j\omega}{2cz}(x_0^2)} \right] e^{j2pf_{x_0}x_1} df_{x_0}. \quad (5)$$

У дискретній формі вираз (5) матиме вигляд

$$U(x_{1i}) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \left[U\left(\frac{x_{0i}}{\lambda z}\right) e^{-\frac{j\pi}{\lambda z}x_{0i}^2} \right] e^{\frac{j2\pi}{\lambda z}x_{1i}x_{0i}}. \quad (6)$$

Як випливає з (6), об'єктна функція $U(x_{1i})$ відповідає зворотному перетворенню Фур'є функції голограми $U(x_{0i})$, помноженої на фокусує-

чий множник Френеля $e^{-\frac{j\pi}{\lambda z}x_{0i}^2}$. Відтак, алгоритм реконструкції акустичного зображення точкового джерела $U(x_{1l})$ по одновимірній голограмі $U(x_{0i})$ є наступний.

1. Лінеаризація функції просторових частот $U(f_{x_0})$ покомпонентним множенням на множник, спряжений фазовому множнику Френеля $e^{-\frac{j\pi}{\lambda z}x_{0i}^2}$:

$$U'(f_{x_{0i}}) = U(f_{x_{0i}}) e^{-\frac{j\pi}{\lambda z}x_{0i}^2}. \quad (7)$$

Зазначимо, що фазовий множник $e^{-\frac{j\pi}{\lambda z}x_{0i}^2}$ являє собою дискретну голограму точкового джерела хвилі з одиничною амплітудою і нульовою початковою фазою, яке розміщене у точці $x_1 = 0$ об'єктної осі x_1 . Із виразу (7) випливає, що після виконання операції лінеаризації функція $U(x_{1l})$ відповідатиме Фур'є-перетворенню лінійної суми просторових гармонійних складових $U\left(\frac{x_{0i}}{\lambda H}\right) e^{j\frac{2\pi}{\lambda z}x_{1l}x_{0i}}$ з комплексними амплітудами U і просторовими частотами коливань $\frac{2\pi x_{1l}}{\lambda z}$. (За умовою дискретизації $x_{1l} = x_{0i}$).

Процедуру покомпонентного множення фазової голограми будемо розглядати як лінійно-частотну демодуляцію (ЛЧД), оскільки в даному випадку виключаються компоненти зі значеннями фази $(\pi/\lambda z)x_{0i}^2$ з квадратичною залежністю від x_{0i} і залишаються функції гармоніки зі значенням $U(x_{1l})$, лінійно залежним від значень x_{0i} .

2. Виконання проміжної операції фільтрації даних лінеаризованої одновимірної голограми від сигналів-завад ревербераційного типу здійснюється за допомогою покомпонентного множення функції лінеаризованої голограми на функцію «вікна» Дольфа—Чебишева. Оскільки центральною частотою в спектрі функції вікна є в даному випадку просторова спектральна складова з нульовою частотою, ефективно подавлення всіх інших просторових гармонік в сигналі голограми здійснюється за допомогою операції «windowing» з використанням chebwin-фільтру.

При спектральному розкладанні сигналу на кінцевому інтервалі тільки частоти, які співпадають з частотами базису, проектуватимуться на єдиний базисний вектор, а сигнали з частотами, відмінними від базисних, є неперіодичними у вікні спостереження і їх періодичне продовження має розриви, спричинені спектральними внесками перешкод на всіх базисних частотах, що спотворює значення амплітуд базисного вектора Фур'є перетворення. У результаті з'являються так звані вторинні максимуми

Фур'є-перетворення сигналів-завад, що впливають на точність відновлення амплітуди ехосигналів на растровій лінії (лінії сканування). Щоб зменшити вплив кінцевості апертури, зменшують порядок розриву на межі апертури через зважування даних одновимірної звукової голограми поблизу границь апертури. При цьому вибір вікна здійснюється так, щоб сигнал після зважування мав значні проекції на базисний вектор з частотами, близькими до частот, що цікавлять, в спектрі сигналу.

Відтак, оскільки в спектрі лінеаризованої голограми важливою є спектральна складова з просторовою частотою $f(x_0) = x_0 / \lambda z$, де $x_0 = 0$, всі інші частоти спектру ЛЧД-голограми можуть бути відфільтровані, у тому числі і частоти, відповідні спектрам ревербераційних сигналів-завад.

Позначивши функцію вікна w , оброблену ЛЧД-голограму запишемо у вигляді $U'_w(f_{x_{0i}}) = U(f_{x_0}) * w$, де знаком $*$ позначено покомпонентне множення векторів $U'_w(f_{x_{0i}})$ та w .

3. Відтворення амплітуди ехосигналу в точці на акустичній осі для певного значення через виконання зворотного Фур'є-перетворення функції $U'_w(f_{x_{0i}})$ має вигляд $\hat{U}_{1l}^w = f^{-1}\{U'_w(f_{x_{0i}})\}$. Таким чином здійснюється оцінка амплітуди постійної складової сигналу в точці на об'єктній лінії для $x_{1l} = 0$. Слід зазначити, що, оскільки інші спектральні складові \hat{U}_{1l} в растровому методі формування зображення втрачають сенс, оцінка \hat{U}_{1l} здійснюється підсумовуванням комплексних амплітуд вектора $U'_w(f_{x_0})$ і визначенням інтенсивності у вигляді $E_{1l} = \hat{U}_{1l}^w (U_{1l})^*$.

4. Отримані за даними реконструкції одновимірних голограм значення інтенсивності в точках на акустичній осі (лінії сканування) для певних значень z компонується в растрову лінію зображення, а растрові лінії — в акустичне двовимірне зображення вертикального перетину досліджуваного середовища (об'єкта). В цьому випадку для двовимірного об'єкта можна використати Фраунгоферову апроксимацію, і тоді просторову дифракційну картину в площині голограми можна записати у вигляді інтеграла:

$$U(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda z} (ux+vy)} dx dy, \quad (8)$$

де $f(x, y)$ — розподіл комплексної амплітуди світла або звука на двовимірному об'єкті; x, y — просторові координати в площині об'єкта; u, v — просторові координати в площині реєстрації хвильового фронту; λ — довжина хвилі джерела; Z — відстань між об'єктною площиною і площиною голограми.

Із виразу (8) видно, що дифракційна картина являє собою двовимірне Фур'є-перетворення об'єкта, при цьому значення $2\pi u / \lambda Z$ і $2\pi v / \lambda Z$ відпо-

відають просторовим частотним змінним ω_x і ω_y . У випадку, коли площина вимірювань розташована ближче до об'єкта, для дифракційної картини більше підходить опис голограми Френеля:

$$U(u, v) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda Z} e^{j\frac{K}{2Z}(u^2+v^2)} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{\frac{jK}{2Z}(x^2+y^2)} e^{-\frac{j2\pi}{\lambda z}(ux+vy)} dx dy.$$

При цьому інтеграл відповідає двовимірному Фур'є-перетворенню функції $f(x, y) e^{\frac{jK}{2Z}(x^2+y^2)}$ і, таким чином, дифракційна картина Френеля представляє Фур'є-перетворення, помножене на відповідний фазовий множник. У випадку акустичної голограми є можливість відтворювати об'єкт, використовуючи лише фазову інформацію комплексних амплітуд $U(u, v)$.

Висновки

Фазове відтворення в значній мірі зберігає кореляцію між сигналами. Із цього можна зробити висновок про те, що «події» в зображенні і об'єкті — точки і лінії — повинні зберігати своє місцеположення. Фаза відображає взаємне геометричне положення деталей в об'єкті і зображенні значно краще, ніж амплітуда. Наприклад, зміщення (в часі або просторі) сигналу не впливає на амплітуду перетворення Фур'є (Френеля), а впливає тільки на фазу, зумовлюючи появу лінійного фазового члена. Зменшення масштабу відтвореного Фур'є-перетворенням зображення також пов'язано з адекватним масштабуванням фази голограмного опису. Про ефективність фазової інформації при відтворенні сигналів зображень в системах дефектоскопії голографічного типу свідчить і той факт, що амплітуди спектральних складових на високих частотах мають тенденцію до спаду, тоді як короткотривалі деталі об'єктів відображаються більш високими просторовими частотами, безпосередньо пов'язаними із зміною фазової інформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бэмбер Дж., Дикинсон Р., Эккерсли Р. и др. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 542 с.
2. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М: Машиностроение, 1981.
3. Фалькевич С.А. Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия, 1984, № 3, с. 3—16.
4. Евдокимов В.Ф., Огир А.С. Математическое моделирование сигналов и процессов в акустической голографии: проблемы и перспективы // Электрон. моделирование, 1996, 18, № 4, с. 29—33.

5. Евдокимов В.Ф., Огир А.С. О построении системы ультразвукового контроля конструкционных материалов объектов энергетики и машиностроения// Там же, 2001, **23**, № 5, с. 85—90.
6. Евдокимов В.Ф., Огир А.С. О дискретной математической модели звуковой голограммы// Там же, 2000, **22**, № 1, с. 3—8.
7. Огир А.С. Исследование процессов компьютерного восстановления акустических изображений //Методы и средства компьютерного моделирования. Сб. науч. трудов ИПМЭ НАНУ, 1997, с. 41—44.
8. Огир А.С. О построении квазиголографической системы акустического контроля материалов. // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ, 2002, вип. 13, с. 76—81.

Отримано 29.05.19

REFERENCES

1. Bamber, J., Dickinson, R. and Eckersley. (2008), *Ul'trazvuk v meditsine. Fizicheskiye osnovy primeneniya* [Ultrasound in medicine. Physical bases of application], FIZMALIT, Moscow, Russia.
2. Ermolov, I.N. (1981), *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* [Theory and practice of ultrasonic testing], Mashinostroyeniye.
3. Falkevich, S.A. (1984), "Phased arrays in ultrasonic flaw detection", *Defektoskopiya*, no. 3, pp. 3-16.
4. Evdokimov, V.F. and Ogir, A.S. (1996), "Mathematical modeling of signals and processes in acoustic holography: problems and prospects", *Elektronnoye modelirovaniye*, Vol. 18, no. 4, pp. 29-33.
5. Evdokimov, V.F. and Ogir, A.S. (2001), "On building an ultrasonic inspection system for structural materials of energy and engineering facilities", *Elektronnoye modelirovaniye*, Vol. 23, no. 5, pp. 85-90.
6. Evdokimov, V.F. and Ogir, A.S. (2000), "On the discrete mathematical model of the sound hologram", *Elektronnoye modelirovaniye*, Vol. 22, no. 1, pp. 3-8.
7. Ogir, A.S. (1997), "Investigation of computer-aided reconstruction of acoustic images", *Metody i sredstva komp'yuternogo modelirovaniya. Sb. nauch. trudov IPME NANU*, pp. 41-44.
8. Ogir, A.S. (2002), "On the construction of a quasi-holographic system of acoustic control of materials", *Modelyuvannya ta informatsiyini tekhnolohiyi. Zb. nauk. prats' IPME NANU*, Vol. 13, pp. 76-81.

Received 29.05.19

Е.А. Огир

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕКОНСТРУКЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Разработан вычислительный метод на основе процедуры фильтрации реверберационных сигналов-помех и вторичных дифракционных максимумов Фурье-преобразования при воспроизведении диагностических изображений, позволяющий улучшить пространственное разрешение системы более чем в шесть раз. Метод может быть применен в медицинской диагностике для повышения эффективности обнаружения низкоконтрастных новообразований в начальной стадии развития и в задачах неразрушающего контроля для

виявлення мельчайших дефектов материалов и сред (в области строительства, энергетики и топливной промышленности).

Ключевые слова: реконструкция, сигналы-помехи, фильтрация, пространственное разрешение, эхосигнал, голограмма.

E.A. Ogir

METHOD OF INCREASING THE QUALITY OF RECONSTRUCTION OF DIAGNOSTIC IMAGES BASED ON INTEGRAL CONVERSIONS

A computational method was developed based on the filtering of reverberation signals-interferences and secondary diffraction maxima of the Fourier transform - the conversion when playing diagnostic images, improves the spatial resolution of the system more than 6 times. The method is intended for use: in medical diagnostics to increase the detection efficiency of low-contrast neoplasms of the initial stage of development and in non-destructive testing tasks to detect the smallest defects in materials and media (in the construction, energy and fuel industries).

Keywords: reconstruction, interference signals, filtering, spatial resolution, echo signal, hologram.

ОГПР Олена Олександрівна, аспірантка, мол. наук. співр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України. у 2003 р. закінчила Національний авіаційний університет (м. Київ). Область наукових досліджень — математичне і комп'ютерне моделювання в області ультразвукової діагностики матеріалів і середовищ, обробка діагностичних зображень.