

О.С. Огір, Київ
О.Р. Ярема, Львів

ПОБУДОВА ГОЛОГРАМНИХ ОПИСІВ ОБ'ЄКТІВ І СЕРЕДОВИЩ В УЛЬТРАЗВУКОВІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Abstract. The systems of holographic scanner with a one-dimensional raster model for representing a hologram description of the environment in the field of medical imaging and ultrasound non-destructive testing of materials is the development of well-known echoscopy systems that can be interpreted as systems for processing amplitude holograms with known image quality characteristics.

Вступ

Голограма – особливим способом зафіксований просторовий амплітудно-фазовий портрет відбитого від об'єкта хвильового поля в заданій площині реєстрації. Тривимірною голограма, відповідно, є об'ємною характеристикою розподілу амплітудно-фазових параметрів відбитого від об'єкта хвильового поля в фіксованому обсязі простору, в якому поширюється об'єктна хвиля. У комп'ютері плоска голограма може бути представлена двовимірним масивом інформації про розподіл фазового поля (поля комплексних амплітуд) [1, 2].

Графічне представлення комплексної голограми об'єкта

На рис. 1 та 2 представлена графічна інтерпретація реальної частини комплексної голограми точкового об'єкта для відстаней Z – між об'єктною площиною і площиною голограми, виражених в довжинах хвиль λ , відповідно, $Z = 0,1 \cdot \lambda$ і $Z = 500 \cdot \lambda$. Видно, що комп'ютерна модель голограми точкового джерела поблизу об'єктної площини являє наближення до функції Дірака, а на відстанях Z на 1,2 порядку великих, модель голограми представляє функцію косинуса (реальна частка) і функцію синуса в комплексному вираженні [3].

Тривимірною (об'ємною) голограма в комп'ютері може бути представлена тривимірним масивом інформації або, що теж саме, лінійним набором двовимірних масивів інформації.

Фізичні оптичні голограми отримують на основі реєстрації інтенсивності інтерферуючих в просторі когерентної об'єктної і опорної хвиль в будь-якому плоскому або об'ємному середовищі. Такий складний і тонкий фізичний експеримент, як реєстрація фізичної голограми, зобов'язаний технічній складності процесу реєстрації фазових розподілів в оптичному діапазоні хвиль, тобто відсутністю лінійних детекторів амплітуди і фази об'єктної хвилі в оптичному діапазоні хвиль.

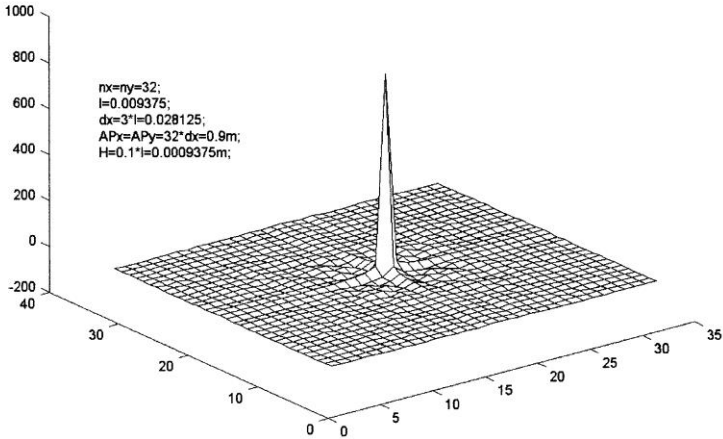


Рис. 1. Графічна інтерпретація реальної частини комплексної голограми точкового об'єкта для відстані між об'єктною площиною і площиною голограми $Z = 0,1 \cdot \lambda$.

В дефектоскопії, радіобаченні немає проблем з реєстрацією просторових розподілів фазорних полів (лінійні і плоскі антенні решітки, синтезована апертура – як результат відносного переміщення приймача сигналів і об'єкта відображення), тому в області звукової і радіоголографії, можуть бути успішно використані комп'ютерні (чисельні) методи перетворення двотривимірних масивів голограмних описів у відповідні їм зображення. Математична модель лінійної (одновимірної) голограми точкового джерела в зоні Френеля представляє сигнал, відомий в одновимірному представленні як близький до «лінійно-частотно-модульованого сигналу зі стаціонарною фазою» (ЛЧМ сигнал) рис. 3 а. Цей сигнал має точку «стаціонарної фази» від якої уздовж лінії координати X фаза сигналу має квадратичну залежність від просторової координати X .

ЛМЧ-сигнал має вигляд:

$$U(x) = A \cdot l \frac{j\pi}{\lambda z} (x-x_0)^2$$

В точці стаціонарної фази $x = x_0$ просторова частота коливань дорівнює нулю і змінює знак на протилежний. Слід зазначити, що одновимірна модель точкового джерела є зображенням двовимірної моделі в площині перетину X, Z .

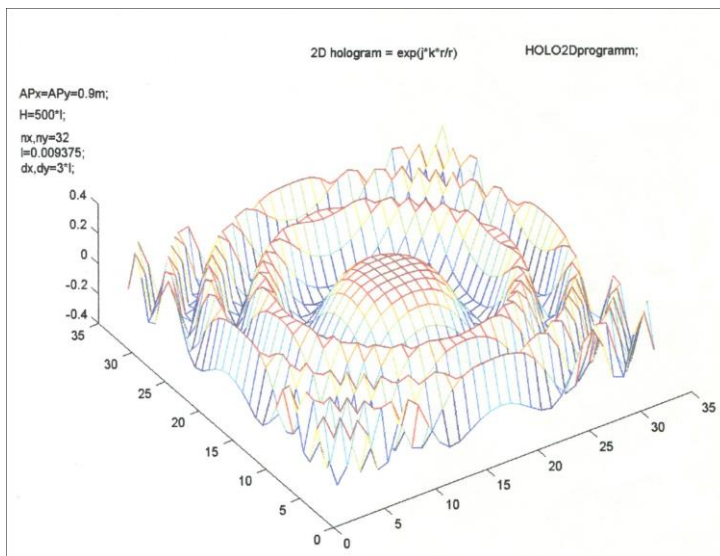


Рис. 2. Графічна інтерпретація реальної частини комплексної голограми точкового об'єкта для відстані між об'єктною площиною і площиною голограми $Z = 500 \cdot \lambda$.

Дана модель точкового джерела або її Фур'є-образ в двовимірному або одновимірному представленні використовується при комп'ютерному відновленні акустичних зображень кореляційно-фільтровим методом, або методом оберненого хвильового фронту.

В якості моделі голограми складного об'єкта, придатної для використання в алгоритмічних, чисельних методах відновлення зображень за їх голограмним описом, є модель дифракції у вигляді інтегральної теореми Зоммерфельда-Френеля. Обернення дифракційного інтеграла з метою знаходження комплексних амплітуд вихідного об'єктного поля може бути здійснено на основі апроксимаційних моделей інтегрального рівняння, що відповідають геометрії розташування об'єкта та голограми, схем сканування і реєстрації даних [2, 4, 5].

Практично всі відомі методи обігу дифракційного інтеграла базуються на моделі параксіального наближення Френеля з обмеженнями типу $\{X_1, Y_1; X_0, Y_0\} \ll Z$. В даному випадку x_1, y_1 – розміри об'єктної площини поперечного перетину звукового імпульсу, X_0, Y_0 – значення апертури вимірювань.

Однак використання параксіальної моделі Френеля є вкрай проблематичним з наступних причин:

– обмеження на співвідношення між апертурою вимірювань X_0, Y_0 та величиною Z типу $Z = X_0, Y_0$ для систем медичної візуалізації та систем

ультразвукового неруйнівного контролю вступає в протиріччя з втратами високочастотного ультразвукового сигналу для великих відстаней Z ;

– малі відносно величини Z значення апертури вимірювань негативно позначаються на точності оцінювання відтворюваних амплітуд (інтенсивності) у пікселях зображення за рахунок неортогональності Фур'є-перетворення сигналу голограми на обмеженій апертурі та недостатньої кількості інформації через обмеженість смуги частот реєстрованого сигналу на обмеженій апертурі. Апроксимаційна модель звукової голограми, вільна від обмежень Френеля типу $Z \gg X_0, Y_0$.

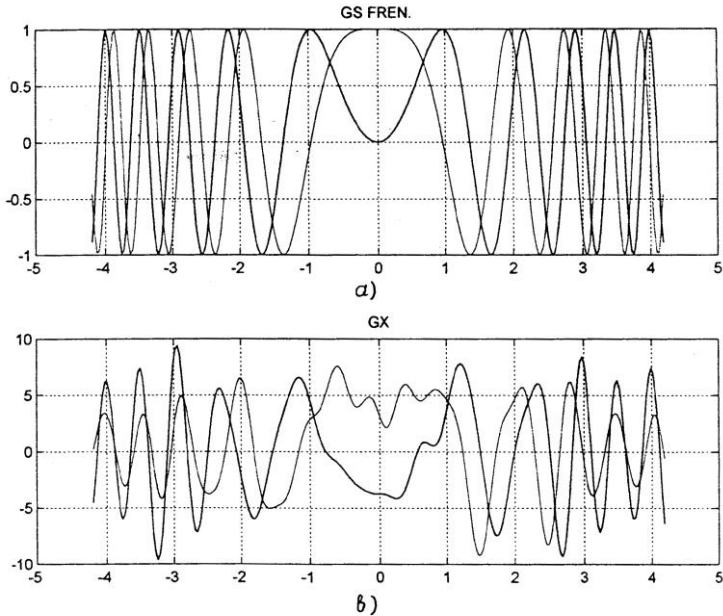


Рис. 3. ЛЧМ сигнал

Істотне обмеження на апертуру вимірювань вносить вимога квазістаціонарності вимірюваних даних в процесі реєстрації звукової голограми. Обмеження на величину апертури пов'язане зі значенням поздовжньої роздільної здатності системи $\frac{c\tau}{2}$, де c – швидкість ультразвукової хвилі, τ – тривалість зондувального сигналу. Виконання умови квазістаціонарності вимірювань даних звукової голограми може бути записано, як виконання умови: різниця ходу променів від будь-якої точки-неоднорідності об'єктної площини (лінії) до будь-яких двох приймачів апертури не повинна перевищувати величини $c\tau$ довжини зондувального імпульсу[4, 5, 6].

Таким чином, чим більше вимірювальна апертура, тим більше значення $c\tau$ вимагає для забезпечення умови квазістаціонарності і тим нижче поздовжня роздільна здатність системи.

Модель голограмного опису середовища

Шляхом вирішення цієї проблеми може бути розробка спеціальної моделі реєстрації даних звукової голограми за часовими реперними точками щодо часу реєстрації комплексної амплітуди звукового поля в точці апертури на акустичній осі звукового променю. Однією з основних апроксимаційних моделей голограмного опису середовища є одномірно-растрова модель, що дозволяє по голограмному опису середовища в обсязі звукового імпульсу, що послідовно реєструється для кожного просторово часового положення звукового імпульсу в звуковому промені, відтворювати значення інтенсивності в точках на об'єктній лінії. Таким чином, тривимірне положення точок-неоднорідностей в звуковому імпульсі апроксимується їх одновимірною проекцією на об'єктну лінію. При такій апроксимації реконструйовані значення амплітуд сигналів в звуковому імпульсі не мають спотворень зважаючи на те, що матриця фазової передатної характеристики простору з експоненціальними компонентами не змінює модулів у спектрі власних чисел.

Реконструйовані значення точок на перетині акустичної осі звукового променю і об'єктної лінії звукового імпульсу компонується в растрову лінію зображення, растрові лінії – в кадр акустичного зображення. Треба зазначити, що кількість інформації в одновимірній голограмі є достатнім для відтворення точкових зображень неоднорідностей на осі звукового променю з високою роздільною здатністю [7].

Розподіл поля, розсіяного об'єктом $U(x_0, y_0)$, може бути записано в площині акустичної голограми у вигляді:

$$U(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) \cdot l^{j\varphi(x_0, y_0)},$$

де $A(x_0, y_0)$ – амплітудний, а $\varphi(x_0, y_0)$ – фазовий розподіл поля, відповідно.

В низькочастотній голографії, коли можлива миттєва реєстрація коливань з точністю до фази, в акустичній голографії випадає інтерференційний процес, органічно властивий оптичній голографії при реєстрації фазових компонент голограми.

Велика різниця в просторових масштабах оптичних і акустичних хвиль призводить до значних кількісних відмінностей в параметрах і характеристиках оптичних і акустичних голографічних пристроїв [8, 9]. Хвильові розміри оптичних апертур реєстрації даних приблизно дорівнюють 10^4 - 10^6 , в той час, як наприклад, в гідроакустиці голографічна система з

лінійною вимірювальною решіткою розміром $D=6\text{м}$ на частоті-носії 160кГц з довжиною хвилі $\lambda=0,01\text{м}$, має хвильовий розмір апертури

$$D_B = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 6\text{м} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6}{0,01} \approx \frac{37}{0,01} \approx 3700, \text{ що відповідає } 10^3 \div 10^4. \text{ Це говорить}$$

про те, що реєстрована дискретна інформація може дати при комп'ютерному перетворенні голограми якість зображення, хоча і те, що не відповідає оптичному, але з достатньою роздільною здатністю для розрізнення деталей донного рельєфу і підводних об'єктів, враховуючи, що роздільна здатність γ такої акустичної КГ-системи дорівнює $\gamma=\lambda \cdot N/D$, де N – дальність від вимірювальної решітки до об'єкта.

Наприклад: $N=100\text{м}$, тоді $\gamma=0,01 \cdot 100/6 \cong 0,167\text{м}$, тобто близько 17см .

Для КГ-системи медичної візуалізації ця характеристика буде відповідати, наприклад, при апертурі вимірювань 124мм , $\lambda=0,43\text{мм}$, $D_B=2\pi \cdot 124/0,43 \cong 760$, та при $N=50\text{мм}$ поперечної роздільної здатності $\gamma=0,43 \cdot 50/124 \cong 0,17\text{мм}$. Якщо апертуру зменшити в 2 рази, то $\gamma \approx 0,35\text{мм}$, що майже на порядок краще, ніж в системах дефектоскопії цього класу неголографічного типу.

Висновок

В літературі існують недостатньо обґрунтовані твердження про те, що дискретна просторова вибірка значень комплексних амплітуд поля призводить до того, що при відновленні акустичних зображень з дискретної інформації голограми з обмеженою апертурою, спектри зображень мають безмежні «хвости» і можна говорити тільки про умови не перевищення спотвореннями деякого заданого значення [7, 9]. При цьому для неспотвореного відновлення зображення відповідно до теореми Котельникова інтервал між просторовими вибірками по кожному напрямку не повинен перевищувати $\lambda_{\min}/2$, де λ_{\min} – довжина хвилі для гармоніки з максимальною просторовою частотою в спектрі голограми. В цьому випадку в якості опорного сигналу, що зберігається в пам'яті комп'ютера, при комп'ютерному відновленні використовується спектр опорного сигналу, процес відновлення при цьому зводиться до знаходження піку кореляційної функції голограми і опорного сигналу. Природно вимагати в цьому випадку, щоб звукова голограма мала необмежений спектр просторових частот, що вступає в пряме протиріччя з обмеженнями на розмір вимірювальної апертури та інтервал дискретизації – відстань між елементами вимірювальної решітки.

Зауважимо також, що схожа математична модель звукової голограми для відновлення за методом ОХФ і КФ, не дозволяє використання фільтраційних процедур згладжування звукової голограми з метою зменшення прикордонних ефектів виникнення «спектральних хвостів» у спектрі голограми, оскільки при цьому поперечний дозвіл (ширина кореляційних піків) неприпустимо зростає. В обчислювальній процедурі відновлення зображень на основі методу Френеля-Фур'є з використанням одновимірної

растрової апроксимації, за один прохід звукового імпульсу в середовищі будується растрова лінія зображення – вектор – рядок зображення. Кожна точка вертикальної растрової лінії конструюється за даними одновимірної голограми звукового поля, що реєструється, яка відповідає певному просторово-часовому положенню звукового імпульсу в середовищі [2, 6, 8, 9].

Інформаційний образ точки на растровій лінії в одновимірній моделі голограми після лінеаризації множителем, комплексно зв'язаних з множителем Френеля, є просторова гармоніка нульової частоти, тобто постійна складова функції звукової голограми. При цьому зникає вимога дискретизації звукової голограми з інтервалом, що відповідає теоремі Котельникова і виникає можливість використання ефективних фільтраційних процедур аподизації (згладжування) сигналу голограми на краях апертури з метою фільтрації вторинних дифракційних максимумів (вторинних пелюсток Фур'є-перетворення та фільтрації ревербераційних сигналів-завад).

1. *Евдокимов В.Ф., Огир А.С.* О принципах построения компьютерных систем звуковидения. – Электронное моделирование, 1994, №3. – С.72-78.
2. *Євдокимов В.Ф.* Дослідження характеристик якості УЗ зображень та алгоритмів їх обробки. / О.С. Огір, О.О. Огір // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Вип. 80. – К.: 2017. – С.3-11
3. *Китинг П.* Обработка сигналов при формировании изображений / П. Китинг, Т. Саватарі, Г. Жилинскас // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1979. – Т. 69. – № 4. – С.61-77.
4. *Огір О.О.* Метод підвищення якості реконструкції діагностичних зображень на основі інтегральних перетворень / О.О. Огір // Электронное моделирование. – 2019. – № 4 – С.35-48.
5. *Огір А.С.* Компьютерное моделирование систем отображения подводных объектов / А.С. Огір // Электронное моделирование. – 2002. – № 5. – С.105-114.
6. *Грузман И.С.* Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 352 с.
7. *Огір А.С.* О построении квазиголографической системы акустического контроля материалов / А. С. Огір // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, – Вип. 13. – К.: 2002 – С.76-81.
8. *Огір А.С.* Формирование модели звуковой голограммы, свободной от параксиального приближения Френеля / А.С. Огір // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». – К.: 2003. – Вип. 40. – С.170-177.
9. *Євдокимов В.Ф.* Дослідження характеристик якості УЗ зображень та алгоритмів їх обробки / В.Ф. Євдокимов, О.С. Огір, О.О. Огір // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, – Вип. 80. – К.: 2017. – С.3-11.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859659>

Поступила 16.09.2019р.