

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІМІТАЦІЯ АКУСТИЧНИХ КОГЕРЕНТНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

*В.Ф. Миргород, І.М. Гвоздева*

ОАО “Елемент”, Україна 65016, м. Одеса, пр.Глушка, 29, тел. : +380-482-47-44-53; e-mail: element@farlep.net

Одеський державний екологічний університет, Україна, 65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15; тел.: +380-482-32-67-40; e-mail: onopchenko@mail.ru

Обґрунтовані основні положення моделювання та імітації акустичних когерентних зображень. Запропоновано метод отримання функцій розсіювання типових об'єктів за допомогою напівнатурного експерименту в гідроакустичному басейні з масштабною моделлю. Підтверджена та обґрунтована необхідність та можливість реконструкції фазового розподілу функції розсіювання.

## ВСТУП

Моделювання акустичних когерентних зображень (АКЗ), методи їх математичного опису, обробки та імітації становлять самостійний напрям в сукупності праць, присвячених методам обробки просторових сигналів та полів. Це пов'язано, з однієї сторони, з тим, що існує ряд областей, в яких об'єкти можуть бути досліджені тільки за допомогою активного акустичного зондування: гідроакустика, неруйнівний контроль, медична діагностика. У вказаних областях застосування оптичних коливальних певною мірою обмежено як внаслідок особливостей розповсюдження в середовищі, так і внаслідок незадовільних характеристик одержуваних оптичних зображень. Застосування активних методів та технічних засобів акустичного зондування дозволяє одержати АКЗ об'єктів, що відображають структурну інформацію про той чи інший тип об'єкта, та достатні для їх розпізнавання та імітації. Потрібно зауважити, що одержувані АКЗ можуть не мати свого оптичного аналога, але об'єкт зондування можливо по його АКЗ визначити що до його типу, за допомогою відповідних методів та засобів, аналогічно вирішенню задач розпізнавання оптичних зображень. Такі методи та засоби мають відповідати специфічним особливостям АКЗ, суттєво відмінними від оптичних як внаслідок інших просторово-часових масштабів, так і внаслідок високого рівня когерентності вторинного акустичного поля, що зумовлює його інтерференційний характер.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

При моделюванні та імітації АКЗ типових об'єктів однією із складових проблем є вирішення задач формування АКЗ з достатнім просторово-часовим контрастом та рівнем деталізації.

АКЗ об'єкта зондування в загальному випадку складається з розсіяної дифузної (фонові) та дзеркальної компоненти, що структурно відповідає крупно масштабним нерівностям поверхні відбиття об'єкта і загалом формує його пізнаваний образ. Високий рівень дзеркальної компоненти, що власне визначає одержування зображення як когерентне, дозволяє його розглядати як результат просторово-часової згортки зондуючого поля та деякої функції, загалом комплексно визначеної, що характеризує форму поверхні відбиття об'єкта, за умови врахування деформуючого впливу середовища розповсюдження. Саме тому при моделюванні АКЗ вникає необхідність вирішення комплексу наступних взаємопов'язаних задач [1, 2].

1.Одержання з достатньою деталізацією функції розсіювання (ФР) об'єкта зондування, що відповідає відносному розміщенню на поверхні точок стаціонарної фази (ТСФ), формуючих дзеркальну компоненту АКЗ, з урахуванням коефіцієнтів відбиття (амплітуд), відносних затримок, та фаз парціальних складових.

2.Моделювання просторово-часового розподілу зондувального поля.

3.Моделювання розповсюдження зондувального та відбитого полів з урахуванням явищ рефракції та багатопроміневого розповсюдження шарово-неоднорідному середовищі.

4.Підвищення просторового контрасту одержуваних АКЗ як вибором відповідних зондуємих сигналів, так і методами просторово-часової обробки АКЗ, що відповідають їх високій когерентності, зокрема мультиплікативної. АКЗ, що відповідають їх високій когерентності, зокрема мультиплікативної.

Центральною є перша задача - одержання ФР типових об'єктів зондування (шаблонів) розрахунково-аналітичними методами, або за допомогою натурних вимірів.

Прямий розрахунок ФР як комплексно-визначеної функції нажаль можливий лише для досить простих форм поверхні відбиття. Прямий натурний експеримент потребує досить значних матеріальних ресурсів і можливий для обмеженого кола об'єктів. Тому для вирішення вказаної задачі пропонується використати експериментально-аналітичний метод одержання ФР типових об'єктів на основі напівнатурного моделювання в спеціалізованому гідроакустичному басейні, обладнаному відповідною технікою.

Обґрунтованою особливістю акустичних сигналів та зображень є висока ступінь їх когерентності, що дозволяє увести саме поняття "акустичне когерентне зображення". При вирішенні задачі імітації АКЗ необхідно формувати пізнаваний образ об'єкта зондування, тому потрібно імітувати лише мінімально необхідний набір характеристик певного типу об'єкта, тобто створити його образ. АКЗ, що імітується, повинно відображати як дифузну, так і дзеркальну компоненти вторинного акустичного поля:

$$p(\vec{R}, t) = \sum_{k=1}^N p_k(\vec{R}_k, t) + p_0(\vec{R}_0, t), \quad (1)$$

де  $p$  - амплітуда тиску в довільній точці простору,  $\vec{R}$  - радіус-вектор певної точки, що залежить від кута зору,  $t$  - час,  $N$  - число локальних ділянок відображення, що відповідають ТСФ,  $p_k$  - амплітуди тиску відбитого сигналу,  $\vec{R}_k$  - радіус-вектор ТСФ кожної з локальних ділянок відображення,  $p_0(\vec{R}_0, t)$  - дифузна компонента.

Розподіл вторинного акустичного поля на вказані компоненти зумовлено тим, що при активному зондуванні об'єктів процес взаємодії зондуючого поля та поверхні складається як з геометричного (Кірхгофівського) відбиття акустичних сигналів, так і з їх дифузним (Релеївським) розсіюванням [3].

Домінуючий вплив дзеркальної або дифузної компоненти залежить лише від форми поверхні взаємодії, просторово-часових масштабів відносно довжини хвилі зондуючого поля, що зумовлює певний вигляд функції розсіювання. При наявності нерівностей на поверхні об'єкта зондування, співставимих з довжиною хвилі падаючого поля, переважає дифузна компонента вторинного акустичного поля, а якщо нерівності мають розміри, що багаторазово переважають довжину хвилі, то переважає вплив дзеркальної складово, при цьому, як доведено [3, 4], число таких парціальних

складових в (1) буде не досить великим:  $N \leq 10$ . Вказане співвідношення знайшло своє експериментальне підтвердження при виконанні натурних та напівнатурних вимірів [2, 4]. Встановлено, що навіть для об'єктів із складною формою поверхні відбиття для різних кутів зору число парціальних компонент в (1), що відповідають ТСФ на поверхні складає  $N = 5 \div 7$ . Така досить обмежена кількість ТСФ, що спостережується, зумовлює можливість реалізації пропонованого метода формування ФР об'єктів акустичного зондування.

Визначний характер при формуванні ФР мають фазові співвідношення між дзеркальними компонентами, тому ФР об'єкта дослідження в когерентному полі може бути запропоновано в вигляді:

$$h(\tau, q) = \sum_{k=1}^{N(q)} a_k(q) \exp[j\varphi_k(q)] f[\tau - \tau_k(q)], \quad (2)$$

де  $q$  - кут зору,  $f(\cdot)$  - дельта-подібна ФР окремої ТСФ,  $a_k$ ,  $\varphi_k$ ,  $\tau_k$  - відповідно амплітудний, фазовий та просторово-часовий розподіли ФР.

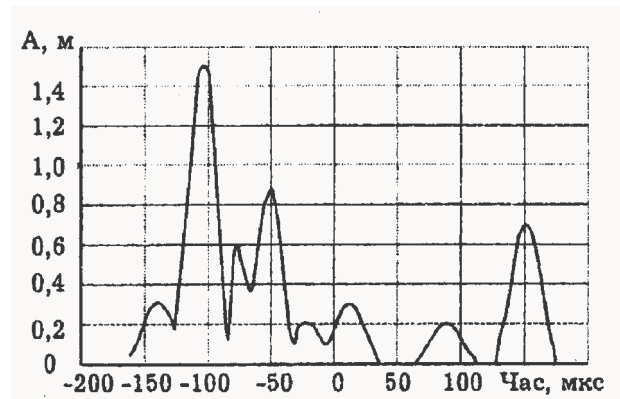


Рисунок 1 - Функція розсіювання: тривалість зондуючого імпульсу  $\tau = 47$  мкс

Найбільше значення для пропонованого підходу що до формування АКЗ має встановлення характеру фазового розподілу ФР, оскільки одержувані зображення мають переважно інтерференційний характер.

Пропонується метод одержання ФР типового об'єкта за допомогою виконання напівнатурного масштабного моделювання в гідроакустичному вимірному басейні з наступним етапом реконструкції фазового розподілу парціальних компонент в (2) [1].

Вихідними даними для пропонованого метода є результати вимірів амплітудного та просторового розподілу дзеркальних компонент (локальних ділянок відбиття ТСФ) та інтегральна амплітуда, як результат їх інтерференції, для різних кутів зору [1]. На рисунку 1 представлена діаграма одного з таких вимірів при використанні зонduючого імпульсу малої просторової протяжності, тобто високої розподільчої здатності. Амплітуди окремих парціальних складових одержано порівнянням з амплітудою відбитого сигналу з еталонної сфери, тому масштабовано в [м]. Відносні затримки відраховуються від геометричного центру об'єкту зондування.

Додатково виконується фіксація амплітуд фронтів луна-сигналу при розповсюдженні переднього фронту імпульсу зондування вздовж поверхні об'єкта, тобто послідовно вимірювались амплітуди часткової інтерференції дзеркальних відображень кожної з ТСФ у вигляді:

$$\begin{cases} aS_1 e^{j\varphi_{S_1}} = a_1 e^{j\varphi_1} \\ aS_2 e^{j\varphi_{S_2}} = a_1 e^{j\varphi_1} + a_2 e^{j\varphi_2} \\ aS_3 e^{j\varphi_{S_3}} = a_1 e^{j\varphi_1} + a_2 e^{j\varphi_2} + a_3 e^{j\varphi_3} \\ \dots \\ aS_N e^{j\varphi_{S_N}} = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\varphi_n} \end{cases} \quad (3)$$

У зв'язку з невизначеністю  $\varphi_{S_k}$  система (3) загалом має  $2^{N-1}$  рішень відносно невідомих  $\varphi_n$ , але лише декілька з них є вірогідними.

Як результат пропонованого експериментально-аналітичного метода реконструкції ФР одержується декілька вірогідних фазових розподілів ТСФ, що дозволяє обґрунтувати сигнатуру об'єкта у вигляді суперпозиції комплексних амплітуд (2).

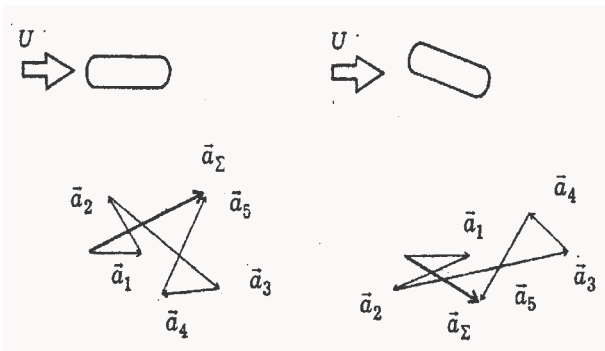


Рисунок 2 - Векторна діаграма об'єкту: поле зондування U.

Вказана послідовність вимірів та розрахунків згідно (3) виконується для кожного з кутів зору в заданому діапазоні, наприклад, через кожних 5 градусів від 0 град. до 180 град., що дозволяє побудувати векторну діаграму ФР досліджуваного об'єкта, фрагмент якої зображено на рисунку 2. Крок по куту зору вибирається з умови достатнього рівня кореляції між суміжними кутовими розтинками ФР.

Для оцінки ефективності та достовірності пропонованого методу реконструкції ФР виконано комплекс експериментальних досліджень в гідроакустичному басейні з масштабною моделлю одного з типових просторово - розподілених об'єктів із складною поверхню відбиття (композиція сферичних, циліндричних фрагментів, ребра, кути, злами та інше). Після розрахунку фазового розподілу за допомогою кореляційного та середньоквадратичного критеріїв співставленні експериментально виміряні луна - сигнали з розрахунковими як результат згортки зонduючих сигналів з розрахованою заздалегідь ФР (2).

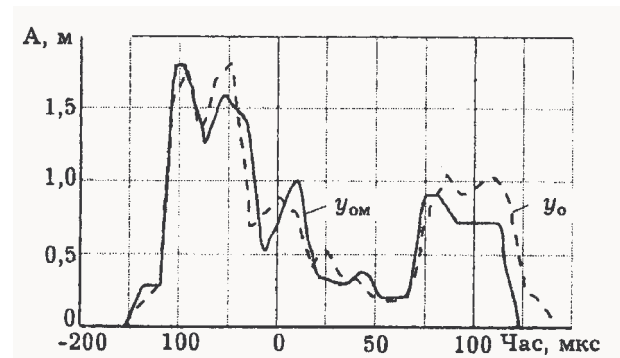


Рисунок 3 - Модельна та експериментально виміряна ехограми  $\tau = 100$  мкс,  $J_1 = 0,972$ ;  $J_2 = 0,1$

Використано різні зондувальні сигнали та широкий діапазон кутів зору, що відповідають кутовим розрізам одержуваних АКЗ досліджуваного об'єкта. Рисунок 3 ілюструє вказаний результат порівняння при застосуванні зонduючого імпульсу протяжністю 100 мкс, який охоплює частковою інтерференцією суміжні ділянки відбиття, які розподіляються відносно коротким імпульсом (Рис.2).

Найкращі результати із значеннями кореляційного критерію близько 0,95 одержані для таких кутів зору, в діапазоні яких дзеркальна компонента вторинного акустичного поля має високу енергетику, оскільки саме такій моделі відповідає ФР, що може бути представлена у вигляді (2).

Одержані кутові розтини АКЗ досліджуваного об'єкту з високим рівнем просторової деталізації

вільні від обмежень, зумовлених деформаціями середовища розповсюдження, що є додатковою перевагою методу напівнатурного моделювання порівняно з натурним експериментом. Для урахування впливу середовища застосовано розроблені програмні засоби [5], що моделюють явища: рефракції, багатопроміневого розповсюдження та інші ефекти спотворення акустичного сигналу при його розповсюдженні.

Додатково виконано моделювання деяких класичних алгоритмів обробки акустичних сигналів в фазованих антенних решітках (ФАР) з урахуванням просторово – часового розподілу вторинного поля. Зокрема, досліджені алгоритми діаграмоформуючої обробки та фазової оцінки пеленгаційного кута. Встановлені обмеження застосування відомих алгоритмів в умовах обробки акустичних полів з флуктуаційним фазовим фронтом, що відповідає явищу інтерференції парціальних складових АКЗ на ФАР. Найбільш інформативними є діаграми фазової оцінки пеленгаційного кута, що цілком узгоджується з експериментальними даними та моделлю ФР у вигляді (2). Слід зауважити, що теоретично встановлений ефект [4] помилкової пеленгації за межі геометричних розмірів та відповідно одержання недостовірних оцінок кутового розміру об'єкта за його АКЗ знайшов експериментальне підтвердження та обґрунтування за допомогою математичного моделювання.

Розповсюдження у середовищі супроводжується поступовою декореляцією парціальних компонент, навіть при застосуванні сигналів з високою роздільною здатністю. Сигнали на приймальних елементах ФАР у цьому випадку будуть мати складний негаусовий розподіл [6], що відповідає відомому в когерентній оптиці ефекту “спекл” – структури зображення [7].

## ВИСНОВКИ

Згідно з експериментальними даними вторинне акустичне поле об'єктів формується відносно невеликою кількістю (одиниці – десятки) локальних ділянок відображення на поверхні, що є околицею ТСФ за Френелем, що утворюють упорядковану сукупність віртуальних джерел вторинних (відбитих) акустичних коливань. Оскільки розташування ТСФ функціонально пов'язане з рівнянням поверхні відображення, ступінь когерентності віртуальних джерел вторинного поля може бути дуже висока. Об'єднання полів таких джерел можливо тільки з урахуванням фазового розподілу, результатом якого є інтерференція.

Як результат виконаних експериментальних досліджень та розрахунків одержано ФР одного з типових об'єктів. Така ФР вичерпним чином

характеризує АКЗ даного об'єкта, оскільки залежить лише від форми його поверхні відбиття і може змінитися лише із зміною цієї форми, тобто типу досліджуваного об'єкта.

Одержана модель ФР об'єкта зондування дозволяє моделювати кутові розтини його АКЗ та виконувати вірогідну імітацію просторово-часового розподілу вторинного акустичного поля для довільно заданого зондуючого.

Важливість практичного застосування запропонованого методу реконструкції ФР при імітації АКЗ зумовлена можливістю на його основі виконати генерацію тестових ехограм та виконувати оцінку ефективності створеної апаратури розпізнавання та класифікації різноманітних об'єктів за їхніми АКЗ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Миргород В.Ф., Ковешніков С.М., Гвоздева І.М. Комп'ютерне та експериментальне моделювання функцій розсіювання акустичних когерентних зображень. // Труды Одесск. политех. ун-та. – Одесса. – 2002. – Вып. 1(17) - с.167 – 170.
2. Миргород В.Ф., Ковешніков С.М., Гвоздева І.М. Моделювання функцій розсіювання акустичних когерентних зображень з урахуванням фазового розподілу// Труды Одесск. политех. ун-та. – Одесса. – 2002. – Вып. 2(18)- с.166 – 170.
3. Акустика океана //Под. ред. Л.М. Бреховских . – М.: Наука, 1974. – 696 с.
4. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
5. Gvozdeva I.M., Mirgorod V.F. Simulation of the Acoustic Fields of Underwater Extended Objects. Праці 5-ї Всеукраїнськ. Конф. з автоматичного управління: “Автоматика – 98”. – К. – 1998. – с. 355 – 360.
6. Качанов Е.И., Пигулевский Е.Д., Яригин Е.М. Методы и средства гидроакустической голографии. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
7. Теория когерентных изображений // Под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Радио и связь, 1987. – 264