

УДК 543.2, 681.883

Розрахунок форми обвідної відбитого сигналу на основі складної математичної моделі відбиття й розсіювання сигналу

А.І. Гончар, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель, Л.В. Нестеренко

Гончар Анатолій Іванович – член-кореспондент НАН України, д.т.н., с.н.с., директор Науково-технічного центру панорамних акустичних систем НАН України (зараз – Державна установа "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"), Україна, 69000, м. Запоріжжя, вул. Чубанова, 1.

Федосєєнков Сергій Геннадійович – в.о. завідувача відділом панорамних акустичних систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України", Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, 22lex22s@ukr.net.

Шундель Олексій Іванович – науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України", Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, lixuta666@gmail.com.

Нестеренко Любов Володимирівна – молодший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України", Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, nest.lubov.v@gmail.com.

Анотація

Описано та виконано чисельний розрахунок моделі часової залежності акустичної інтенсивності відбитого сигналу від дна залежно від типу донних відкладень, глибини місця й характеристик випромінюючої антени. Модель обвідної відбитого сигналу передбачає ізотропний і гауссово-розподілений рельєф дна, однорідність осаду у верхніх декількох метрах.

Ключові слова: ехо-сигнал, границя розділу, характеристика направленості, донні відклади

Вступ. В геометрії звичайного ехозондування дна звуковий імпульс випромінюється за допомогою гідроакустичної антени вертикально вниз і за часом приходу ехо-сигналу визначається висота антени над дном. Тим не менш, форма і тривалість ехо-сигналу часто сильно відрізняються від вихідного імпульсу, ці спотворення і містять інформацію про процес зворотного акустичного розсіювання, а також про рельєфні і геоакустичні властивості дна.

Описана в даній роботі модель обвідної інтенсивності відбитих сигналів від дна – це часова реалізація основного рівняння гідролокації [23, 28] на основі акустичних моделей зворотного розсіювання, описаних Джексоном та ін. в [15], і аналітичних інструментів, розроблених Де Мустье і Александроу [21] для моделювання ехо-сигналу від морського дна, вимірюного за допомогою багатопробного ехолоту для картографування морського дна. На даний момент немає жодної нової єдиної теорії, і тому використовується тільки конкретна комбінація моделей фізичного акустичного зворотного розсіювання, геоакустичних параметрів і методів обробки ехо-сигналів, щоб визначити форму та інтенсивність середньої обвідної відбитого сигналу, отриманого за допомогою звичайного ехолоту. Спроба отримати абсолютні рівні зворотного розсіювання за вимірними геоакустичними параметрами відрізняє дану роботу від більшості феноменологічних апроксимацій характеристик відкладень, що використовуються у комерційних структурах

[9, 27], які покладаються на непараметричні класифікатори, щоб визначити шари, і вимагає незалежної ідентифікації шару при відборі проб за допомогою відео або керну.

Матеріали і методи. Критерій Релея для дифузного розсіювання монохроматичної звукової хвилі з довжиною λ_a і хвильовим числом $k_a=2\pi/\lambda_a$, для поверхні з середньоквадратичним відхиленням висоти σ від середнього значення, дорівнює:

$$2 k_a \sigma \gg 1 \quad (1)$$

і припускає, що середньоквадратичне відхилення висоти σ повинно перевищувати 1 см. Також на даних частотах проникнення в дно обмежено першими декількома метрами, отже, дно можна вважати однорідним. Грунтуючись на тому, що розсіювання на границі розділу переважає над відбитим сигналом при нормальному падінні, а об'ємне розсіювання переважає при похилому падінні, то часове розділення цих компонентів досягається вибором ширини променя і орієнтації перетворювача.

Модель включає характеристики і геометрію ехолоту (характеристику направленості перетворювача, його висоту, його нахил за вертикаллю), характеристику випромінюваного звукового імпульсу, а також фактори навколишнього середовища (сферичне розсіювання і втрати при поглинанні, оскільки сигнал поширюється через товщу води), зворотне розсіювання сигналу на границі розділу вода-відклад та неоднорідності у відкладах.

Середній розмір частинок описується виразом [15]:

$$M_z = 3.231g \frac{d_g}{d_0}, \quad (2)$$

де d_g - це середній діаметр частинки у міліметрах;

d_0 - базова довжина (1 мм);

M_z - це важливий компонент для визначення швидкості звуку в відкладах, об'ємної густини та коефіцієнта згасання, він викликає особливий інтерес, тому що пов'язаний з даними параметрами через ряд експериментально виведених лінійних рівнянь регресії, розроблених Гамільтоном [11] і доповнених іншими дослідниками [12, 5].

Аналітична форма сигналу, який розсіюється назад від межі розподілу "вода - осад", заснована на вирішенні дифракційного інтегралу Гельмгольца для монохроматичних звукових хвиль. Апроксимація Кірхгофа використовується для вираження поля тиску на площині, яка у локальних місцях є дотичною до границі розділу. Коефіцієнт відбиття $R(\theta_i)$ при куті падіння θ_i вважається сталим на кожній точці границі розділу і дорівнює коефіцієнту відбиття падіння $R_{\perp} = R(0)$ і є функцією відношення щільності осаду і щільності води ρ та швидкості звуку в осаді до швидкості звуку у воді v [3, 1, 4]:

$$R(\theta_i) = \frac{\rho v \cos \theta_i - [1 - (v \sin \theta_i)^2]^{1/2}}{\rho v \cos \theta_i + [1 - (v \sin \theta_i)^2]^{1/2}}. \quad (3)$$

Передбачається, що рельєф межі розподілу осаду ізотропний і описується гаусовським розподілом ζ , з середньоквадратичним розподілом висот σ і двовимірним спектром щільності енергії. Оскільки ζ зазвичай нестационарна і оскільки вибір базової поверхні в якомусь сенсі довільний, доцільно розглянути різницю в висоті між точками на поверхні, розділеної на фіксовані відрізки (горизонтальний вектор \mathbf{r}). Ця різниця висот є локально стаціонарна випадкова змінна, середньоквадратичне значення якої є структурна функція $D(\mathbf{r})$:

$$D(\mathbf{r}) = \langle [\zeta(\mathbf{r} + \mathbf{r}_0) - \zeta(\mathbf{r}_0)]^2 \rangle. \quad (4)$$

Енергетичний спектр щільності рельєфу $W(\mathbf{k})$ для 2D просторового хвильового вектору \mathbf{k} величиною k та структурна функція, пов'язані виразом [13]:

$$D(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (1 - \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})) W(\mathbf{k}) d^2k. \quad (5)$$

Степенева залежність спектру рельєфу виміряна в широкому діапазоні просторових хвиль, для географічного масштабу метри - кілометри до сантиметрового масштабу [6, 7, 10], порівнюваного з довжиною високочастотної акустичної хвилі [8,16-18]. Спектр щільності енергії рельєфу $W(\mathbf{k})$ визначається формулою:

$$W_2(K) = (h_0 K)^{-\gamma} w_2, \quad (6)$$

де $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ - хвильове число донного рельєфу;

Λ - асоційованою довжиною хвилі;

γ - спектральний показник;

w_2 - спектральна сила;

h_0 - базова довжина, дорівнює 1см.

Спектральний аналіз топографії сантиметрового масштабу дає для 2D спектрального показника степеня значення в діапазоні $2 < \gamma < 4$ [8,16-18]. За відсутності вимірювань середнє значення покладається рівним $\gamma=3,25$ для більшості типів дна [5]. На практиці γ і w_2 визначені лінійною регресією для 2D спектру, зображеному на $\log - \log$ шкалі.

Інтегрування рівняння (5) після підстановки рівняння (6) дає в результаті простий вираз структурної функції [15]:

$$D(\mathbf{r}) = C_{\xi}^2 r^{2\alpha}, \quad (7)$$

зі структурною сталою C_{ξ} , заданою

$$C_{\xi}^2 = \frac{2\pi w_2 \Gamma(2 - \alpha) 2^{-2\alpha}}{\alpha(1 - \alpha) \Gamma(1 + \alpha)}, \quad (8)$$

де Γ - гамма функція;

$$\alpha = \frac{\gamma}{2} - 1.$$

Ґрунтуючись на Джексоні [15], спектр рельєфу зі степеневу залежністю обмежений смугою, що розділяє на велико- і дрібномасштабні компоненти шорсткості нерівностей границі, визначеної критичним просторовим хвилевим числом k_c

$$k_c = \left(\frac{\gamma - 2}{8\pi w_2 k_a^2 \cos \theta_i} \right)^{1/(2-\gamma)}. \quad (9)$$

В області великомасштабного рельєфу використовується також середньоквадратичний нахил S^2 для обчислень передачі звукової енергії в осад і середньоквадратичне викривлення R_c^2 для критерію Кірхгофа:

$$s^2 = 2\pi \int_0^{k_c} W(\mathbf{k}) k^3 dk = \frac{2\pi w_2 k_c^{4-\gamma}}{4-\gamma}, \quad (10)$$

$$R_c^{-2} = 2\pi \int_0^{k_c} W(\mathbf{k}) k^5 dk = \frac{2\pi w_2 k_c^{6-\gamma}}{6-\gamma}. \quad (11)$$

На високих частотах проникнення в водонасичені відкладення обмежено першими кількома метрами, і дно можна змоделювати як рідину з втратами і акустичним розсіюванням в результаті коливань показників щільності та заломлення середовища. Крім того, інтенсивність плоскої монохроматичної звукової хвилі, що входить в осад, послаблюється з відстанню. Відповідний коефіцієнт згасання α_b у дБ/м зазвичай залежить від частоти

$$\alpha_b = k_p f_a^m, \quad (12)$$

де k_p – стала згасання, виражена в дБ/м·кГц;

f_a - акустична частота в кГц.

Для неконсолідованих океанічних відкладень, які прийняті тут, дотримуємося спостережень Гамільтона при $m=1$ і використовуємо рівняння регресії [8], що зв'язують k_p з середнім розміром частинки (M_z).

Івакін та Лисанов [14] описали модель зворотного розсіювання в об'ємі осаду, яка включає дисипативний вплив середовища з втратами і характеристику передачі на нерівну поверхню. Застосування варіацій нахилу поверхні потрібно для обчислення поширюваної енергії через границю розділу. Джексон [15] поєднав ці ідеї зі схемою Штокхаузена [26] для акустичного розсіювання на дні під плоскою поверхнею за допомогою інтегрування компонентів передачі при гауссовому розподілі кутів падіння, чис середнє значення було визначено за допомогою середньоквадратичного нахилу s . Даний підхід – це варіант складової моделі розсіювання на нерівності, описаної МакДаніелем і Горманом [19].

Слідуючи результатам Джексона [15], коефіцієнт зворотного розсіювання s_i , що залежить від кута, на границі розділу "вода - осад" задається наступним виразом:

$$s_i(\theta_i) = \begin{cases} R_{\perp}^2 [8\pi \cos^2(\theta_i) \sin(\theta_i)]^{-1} \int_0^{\infty} \exp(-qu^{2\alpha}) J_0(u) du, & \theta_i > 0; \\ R_{\perp}^2 [8\pi\alpha]^{-1} C_{\xi}^{-2/\alpha} (2k_{\alpha}^2)^{(\alpha-1)/\alpha} \Gamma(1/\alpha), & \theta_i = 0; \end{cases} \quad (13)$$

де $q = \cos^2(\theta_i) \sin^{-2\alpha}(\theta_i) C_{\xi}^2 2^{1-2\alpha} k_{\alpha}^{2(1-\alpha)}$;

J_0 - функція Бесселя першого роду нульового порядку.

В об'ємі осаду використовуємо безрозмірний поперечний переріз акустичного зворотного розрізу на одиничну площу та одиницю тілесного кута $s_{vl}(\theta_i)$, визначений наступним виразом

$$s_{vl}(\theta_i) = \sigma_2 V_l(\theta_i) / A, \quad (14)$$

де $A \equiv 2/10 \log_{10} e$.

Вираз $V_l(\theta_i)$ пояснює двосторонні втрати при передачі на границі розділу "вода - осад" з великомасштабною нерівністю, що має невеликий середньоквадратичний нахил. Даний вираз ідентично великомасштабному поперечному перерізу об'ємного розсіювання, описаного Джексоном [15], де $\sigma_2 = \sigma_v / \alpha_b$ називають об'ємним параметром, а σ_v – це коефіцієнт об'ємного розсіювання.

Розглянемо моностатичний перетворювач на висоті a , який випромінює імпульс з тривалістю τ_r і з інтенсивністю $I_x(t)$, $0 \leq t \leq \tau_r$. Енергія імпульсу поширюється як сферична оболонка зі швидкістю звуку v_w . Перетин даної оболонки і дна спочатку набуває форми диска, змінюючись до форми кільця. Найнижчої точки поверхні (надір) імпульс досягає з часом a/v_w , і кільце відхиляється від початкової точки. Проекція на дно за час $t > a/v_w + \tau_r$ показана на рис. 1.

Довжина імпульсу у воді дорівнює $v_w \tau_r$, а його передній та задній фронти створюють кути з надіром θ_2 і θ_1 . Середня огинаюча інтенсивності сигналу зворотного розсіювання $I_i(t)$ бере початок під час детектування дна $t_{bd} = 2a/v_w$. Виходячи з рис. 1 зворотно розсіювана енергія досягає приймача в момент $t = t_{bd}/\cos\theta_2$. Елемент зображення dA розташований під падаючим кутом θ_i , азимутним кутом ψ і на відстані $R = a/\cos(\theta_i)$ таким чином, що

$$dA = R^2 \sin(\theta_i) d\theta_i d\psi. \quad (15)$$

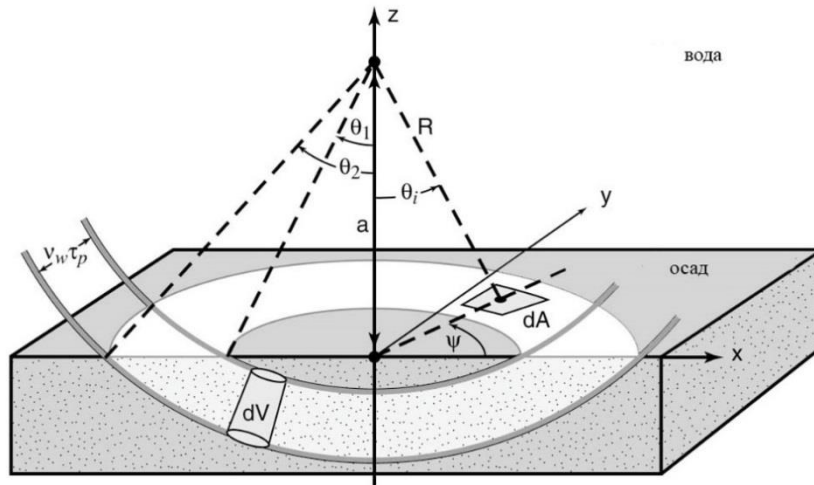


Рис. 1. Геометричне подання елемента зображення dA і об'єму dV , використаного для обчислення обвідної інтенсивності відбитого сигналу з часовою залежністю [25]

Схожі формулювання основного рівняння гідролокації описані в посиланнях [20-22, 24]. Поле повної акустичної інтенсивності, поширюване в зворотному напрямку від границі розділу і зареєстроване перетворювачем, визначається кутовими секторами $\theta_1 \leq \theta_i \leq \theta_2$ та $0 \leq \psi < 2\pi$ за допомогою згортання випроміненого сигналу $I_x(t)$ з коефіцієнтом зворотного розсіювання від дна $s_i(\theta_i)$ з урахуванням характеристики направленості $b(\theta_i, \psi)$ випромінювача

$$I_i(t) = \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta_i=\theta_1(t)}^{\theta_2(t)} I_x \left(t - \frac{2R}{v_w} \right) \frac{s_i(\theta_i) b^4(\theta_i, \psi)}{R^4 10^{\alpha_w R/5}} dA, \quad (16)$$

де

$$\theta_1(t) = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{2a}{v_w(t-\tau_p)}\right), & t - \tau_p \geq t_{bd}; \\ 0, & t - \tau_p < t_{bd}; \end{cases} \quad (17)$$

$$\theta_2(t) = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{2a}{v_w t}\right), & t \geq t_{bd}; \\ 0, & t < t_{bd}; \end{cases}$$

α_w - коефіцієнт поглинання з частотною залежністю у воді.

Елементи в знаменнику рівняння (16) пояснюють сферичне поширення та поглинання у товщі води під час проходження імпульсу в прямому і зворотному напрямках між перетворювачем і дном.

У разі ідеального прямокутного випромінюваного імпульсу інтенсивність $I_x\left(t - \frac{2R}{v_w}\right)$

може бути замінена при константі I_x і винесена за межі інтегралу.

Далі опишемо дискретне формулювання і застосування даної моделі зворотного розсіювання на границі розділу з осадам.

Рівняння (16) чисельно визначається за допомогою дискретного подання, в якому отриманий сигнал обчислений з дискретом за часом τ_s і з індексом n , так що $t = n\tau_s$. Передбачається, що ізотропія скорочує інтеграл двовимірної поверхні до одновимірної функції кута падіння θ_i . Потім дно можна розділити на серію сегментованих кілець J з індексами j . Область $A[j]$ кожного кільця з діапазоном $R[j] = a/\cos(\theta_{ij})$ до його геометричного центру і радіусами $r_1[j]$ та $r_2[j]$ обчислюється

$$A[j] = \pi(r_2^2(j) - r_1^2[j]). \quad (18)$$

Формулювання $r_1[j]$ та $r_2[j]$ залежить від способу, поділу озвученої області. Значення θ_i кутів з індексами θ_{ij} тотожно рівні і їх можна вирахувати за допомогою відповідних значень радіусів кілець, r .

Якщо зміна в діапазоні від близького до далекого кінця $A[j]$ незначна в порівнянні з довжиною імпульсу, енергія, отримана з $A[j]$ при індексі часу n , виражена в формі схожою на підінтегральне рівняння (16) і сумою кільцевих елементів, пов'язаних індексами $j_1[n] \leq j \leq j_2[n]$, які суміщують задні і передні фронти проекції імпульсу при індексі часу n

$$I_i[n] = \sum_{j=j_1[n]}^{j_2[n]} I_x \left(n\tau_s - \frac{2R[j]}{v_w} \right) \frac{s_i(j)A[j]}{att[j]} B_m[j], \quad (19)$$

де $s_i[j]$ - коефіцієнт зворотного розсіювання;

$att[j] = R^4[j]10^{\alpha_w(R[j])^5}$ - пояснює втрати при розповсюдженні у товщі води;

$B_m[j]$ - дискретна реалізація характеристики направленості;

$$B_m(\theta_i) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} b^4(\theta_i, \psi) d\psi.$$

Якщо випромінений сигнал представлений вибірковою послідовністю $I_x(n\tau_s)$, величина $I_x \left(n\tau_s - \frac{2R[j]}{v_w} \right)$ визначається інтерполяцією або округленням.

Виконаємо чисельний розрахунок огинаючих відбитих сигналів від різних типів донних ґрунтів (гравій, пісок, глинистий мул, мул). Розрахунок проводиться за допомогою формули (19). Вихідні дані при розрахунку обвідної відбитого сигналу такі: частота випромінювання ехолоту $f_a=80, 230, 720$ кГц, радіус випромінювальної антени ехолоту $r_a = 2\lambda$, глибина місця 20 м, тривалість випромінюваного імпульсу 0,1 мс. Характеристика направленості для даної антени розраховується за такою формулою [2]:

$$b(\theta) = \frac{2J_1(k_a r_a \sin \theta)}{k_a r_a \sin \theta},$$

де $J_1(\cdot)$ - функція Бесселя першого роду.

Результат розрахунків представлений на рис. 2-5.

Висновки. У статті виконано чисельний розрахунок та описана модель часової залежності акустичної інтенсивності відбитого сигналу від дна. Модель містить характеристики і геометрію ехолоту: характеристика направленості перетворювача, висота від дна, характеристика випромінюваного звукового імпульсу; фактори навколишнього середовища: сферичне поширення і втрати при поглинанні, зворотне розсіювання сигналу на границі розділу "вода - осад".

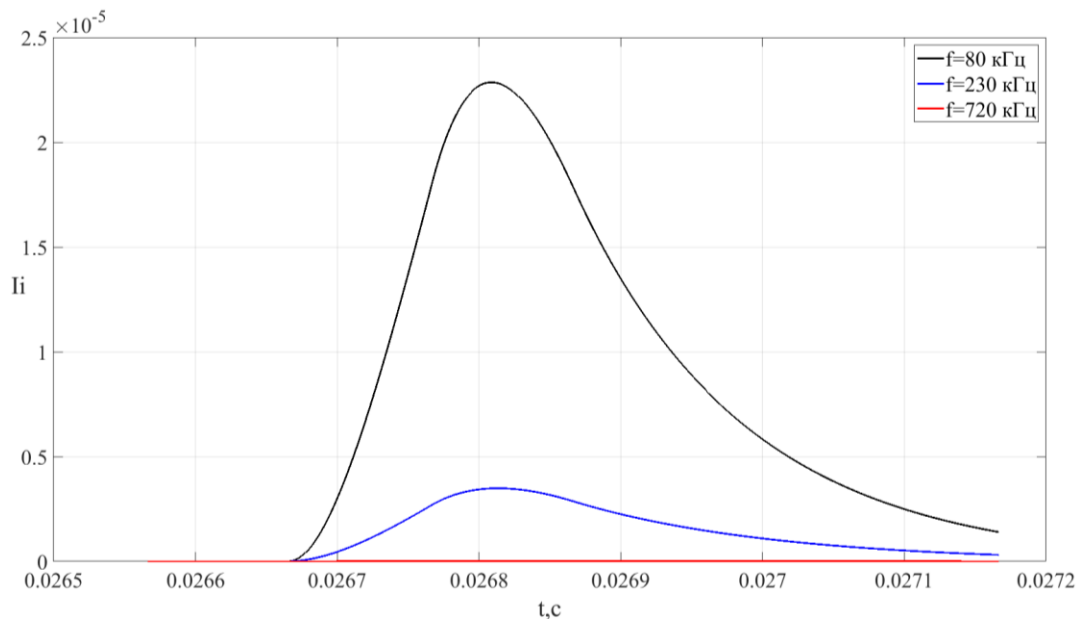


Рис. 2. Розрахована модельна обвідна відбитого сигналу для піску на різних частотах

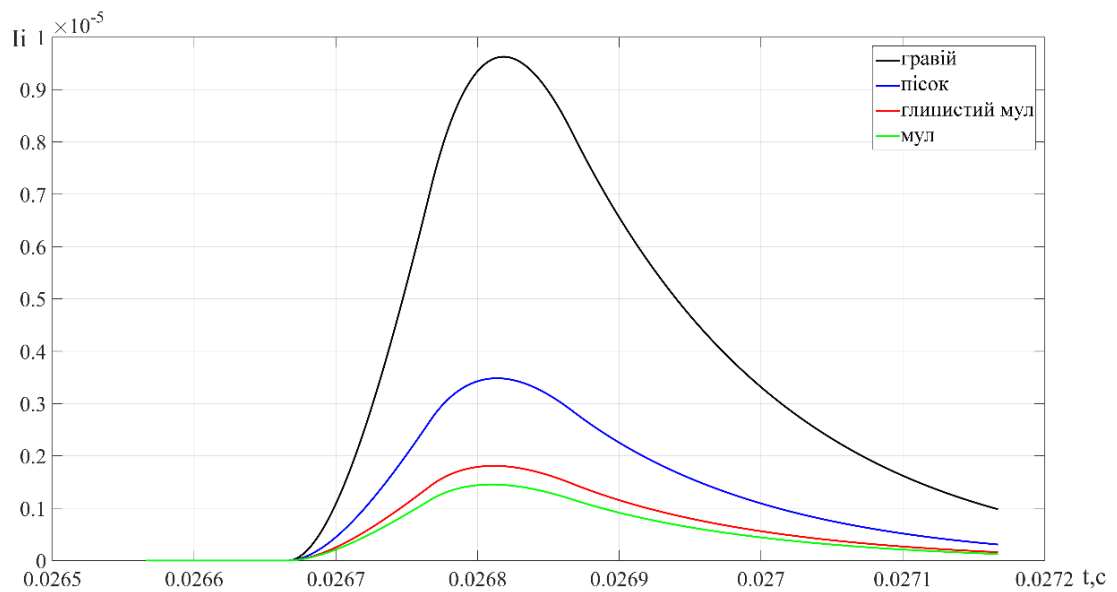


Рис. 3. Розрахована модельна обвідна відбитого сигналу для різних типів ґрунтів ($f_a = 80$ кГц)

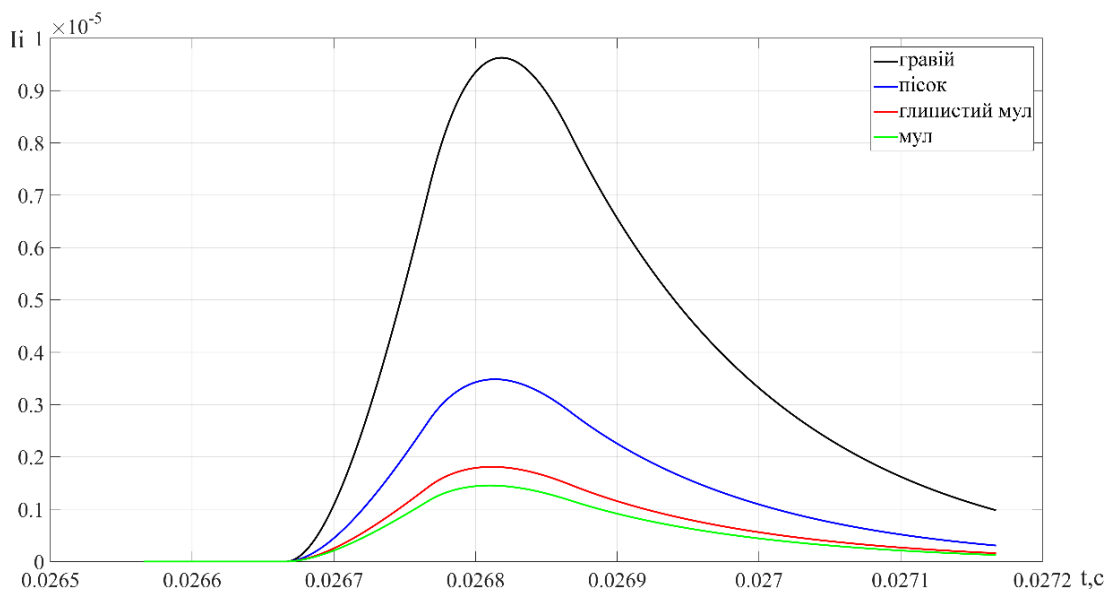


Рис. 4. Розрахована модельна обвідна відбитого сигналу для різних типів ґрунтів ($f_a=230$ кГц)

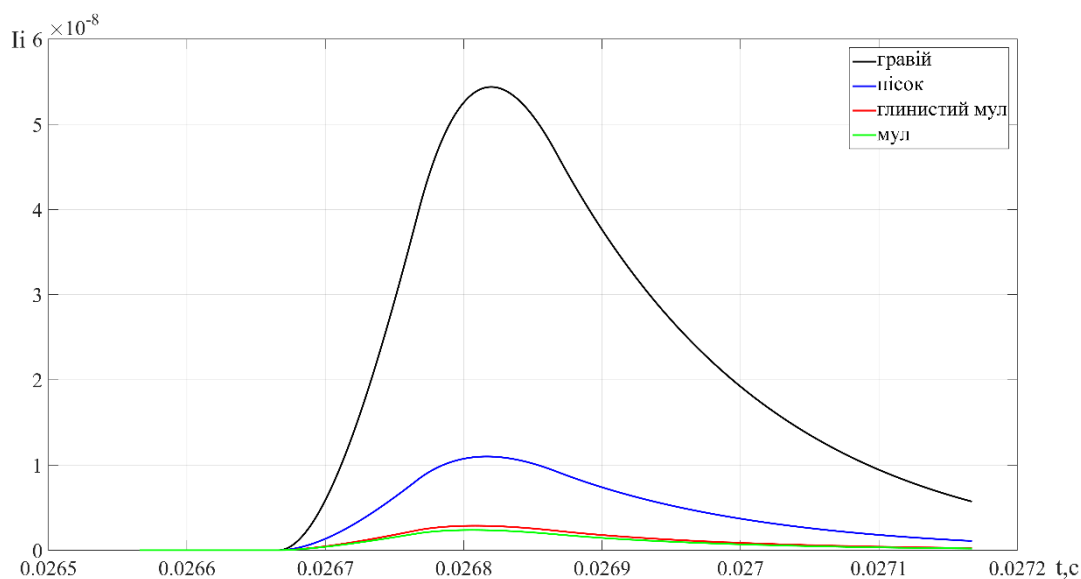


Рис. 5. Розрахована модельна обвідна відбитого сигналу для різних типів ґрунтів ($f_a=720$ кГц)

Розсіювання від межі розподілу розраховується за допомогою теорії Гельмгольца-Кірхгофа з фізичними параметрами, що складаються з потужності w_2 і показника ступеня γ , які визначають двовимірний спектр нерівності границі розділу, відношення щільності відкладень до щільності води ρ і відношення швидкості звуку в відкладеннях до швидкості звуку у воді v . Модифікована версія моделі нерівності, яка пояснює кінцеву тривалість випромінюваного сигналу, прогнозує енергію, відбиту від осаду. Час розповсюдження

відбитого сигналу в результаті великомасштабної нерівності дна, пов'язаний з обчисленнями згортки з розподілом за висотою рельєфу границі розділу.

Модель обвідної відбитого сигналу припускає ізотропний і гаусово-розподілений рельєф дна, однорідність осаду у верхніх кількох метрах, так само як і відношення імпедансів осад - вода (ρv) і стала акустичного згасання осаду (k_p) відповідають середнім емпіричним показникам. Радикальне відхилення від цих умов може призвести до хибних результатів.

Обмеження на викривлення границі розділу, обумовлені апроксимацією Кірхгофа, також обмежують моделювання відкладів, маючи великий середньоквадратичний радіус заокруглення, що відносний акустичній довжині хвилі. Це виключає надзвичайно нерівні (кам'янисті) субстрати або роботу на дуже високих частотах.

Створення моделі форми обвідної відбитого сигналу необхідно для роботи методу класифікації донних відкладів однопроменевим ехолотом. Фізична модель форми обвідної використовується для прогнозу отриманого відбитого сигналу однопроменевого ехолоту. Алгоритм оптимізації виводить вхідні параметри моделі обвідної ехо-сигналу, які максимізують відповідність між прогнозованим (змодельованим) і вимірним відбитим сигналом. Далі за оптимізованими вхідними даними визначається тип ґрунту.

Перелік використаних джерел

1. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1974. 696 с.
2. Свєрдлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1990. 320с.
3. Сташкевич А.П. Акустика моря. Л.: Судостроение, 1966. 359 с.
4. Тюрин А.М. Теоретическая акустика. Л.: Военно-морская академия, 1971. 443 с.
5. APL-UW. High-frequency ocean environmental acoustic models handbook. 1997. 210 p.
6. Bell T.H. Statistical features of sea-floor topography. *Deep-Sea Res. Oceanogr. Abstr.* 1975. V. 22. P. 883–892.
7. Berkson J.M., Matthews E. Statistical characterization of seafloor roughness. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1984. V.9, No 1. P. 48–51.
8. Briggs K.B. Microtopographical roughness of shallow-water continental shelves. *IEEE J. Oceanic Eng.* 1989. V. 14. P. 360–367.
9. Chivers R., Emerson N., Burns D.R. New acoustic processing for underway surveying. *Hydrographic.* 1990. V.56. P. 9 – 17.
10. Fox C.G., Hayes C.E. Quantitative methods for analyzing the roughness of the seafloor. *Rev. Geophys.* 1985. V. 23, No 1. P. 1–48.
11. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 68, No 5. P. 1313–1340.
12. Hamilton E.L., Bachman R.T. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. V. 72, No 6. P. 1891–1904.
13. Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media. Wiley-IEEE Press, 1999. 600 p.
14. Ivakin A.N., Lysanov Y.P. Underwater sound scattering by volume inhomogeneities of a bottom medium bounded by a rough surface. *Sov. Phys. Acoust.* 1981. V. 27, No 3. P. 212–215.
15. Jackson D.R., Winebrenner D.P., Ishimaru A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. V. 79. P. 1410–1422.
16. Jackson D.R., Baird A.M., Crisp J.J., Thomsom P.A.G. High-frequency bottom backscattering measurements in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. V. 80. P. 1188–1199.
17. Jackson D.R., Briggs K.B. High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 92, No 2. P. 962–977.

18. Jackson D.R., Briggs K.B., Williams K.L., Richardson M.D. Test of models for high-frequency seafloor backscatter. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1996. V. 21, No 4. P. 458–470.
19. McDaniel S.T., Gorman A.D. An examination of the composite roughness scattering model. *J. Acoust. Soc. Am.* 1983. V. 73, No 5. P. 1476–1486.
20. Moe J.E., Jackson D.R. Near-field scattering through and from a two-dimensional fluid–fluid rough interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. V 103, No 1. P. 275–287.
21. Moustier C., Alexandrou D. Angular dependence of 12-kHz seafloor acoustic backscatter. *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V.90, No 1. P. 522–531.
22. Nesbitt E.H. Estimation of sea bottom parameters using acoustic backscattering at vertical incidence. Master's thesis, University of Washington, 1988. 278 p.
23. Physics of sound in the sea. National Defense Research Council. Technical report, National Research Council, Peninsula Publishing. Los Altos, CA, 1946. 546 p.
24. Pouliquen E., Lurton X. Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'écho-sondeurs. I. Modélisation d'échos reverberés par le fond. *Acta Acust. European Acoustics Assoc.* 1994. V 2, No 2. P. 113–126.
25. Sternlicht Daniel D., Moustier Christian P. Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10–100 kHz). *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114, No 5. P. 2709–2725.
26. Stockhausen J.H. Scattering from the volume of an inhomogeneous half-space. Report No. 63/9. Naval Research Establishment. Canada, 1963. 5 p.
27. Tsehmahman A.S., Collins W.T., Prager B.T. Acoustic seabed classification and correlation analysis of sediment properties by QTC view. *Proceedings of IEEE OCEANS 97.* 1997. P. 921–926.
28. Urlick R. J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, New York, 1983. 423 p.

Расчет формы огибающей отраженного сигнала на основе сложной математической модели отражения и рассеяния сигнала

А.И. Гончар, С.Г. Федосеенков, А.И. Шундель, Л.В. Нестеренко

Гончар Анатолий Иванович – член-корреспондент НАН Украины, д.т.н., с.н.с., директор Научно-технического центра панорамных акустических систем НАН Украины (сейчас - Государственное учреждение "Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины"), Украина, 69000, г. Запорожье, ул. Чубанова, 1.

Федосеенков Сергей Геннадиевич – и.о. заведующего отделом панорамных акустических систем Государственного учреждения "Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины", Украина, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 42, 22lex22s@ukr.net.

Шундель Алексей Иванович - научный сотрудник отдела панорамных акустических систем Государственного учреждения "Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины", Украина, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 42, lixyta666@gmail.com.

Нестеренко Любовь Владимировна - младший научный сотрудник отдела панорамных акустических систем Государственного учреждения "Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины", Украина, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 42, nest.lubov.v@gmail.com.

Аннотация

В данной статье описан и выполнен численный расчет модели временной зависимости акустической интенсивности отраженного сигнала от дна в зависимости от типа донных отложений, глубины места и характеристик излучающей антенны. Модель огибающей отраженного сигнала предполагает изотропный и гауссово-распределенный рельеф дна, однородность осадка в верхних нескольких метрах.

Ключевые слова: эхо-сигнал, граница раздела, характеристика направленности, донные отложения

Calculation of the form which is bending around the reflected signal on the basis of difficult mathematical model of reflection and dispersion of the signal

A.I. Gonchar, S.G. Fedoseenkov, A.I. Shundel, L.V. Nesterenko

Gonchar Anatoliy Ivanovych - Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr Sci. (Techn.), Senior Researcher, Director, Scientific and Technical Center of Panoramic Acoustic Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine (now – State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"), Ukraine, Zaporizhia, 1 Chubanova Str.

Fedoseenkov, Serhiy Gennadiyovych – Head of the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Ukraine, Kyiv, 42 Akademika Hlushkova Ave., 22lex22s@ukr.net.

Shundel, Oleksiy Ivanovych - Researcher, the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Ukraine, Kyiv, 42 Akademika Hlushkova Ave., lixyta666@gmail.com.

Nesterenko, Lyubov Volodymyrivna - Junior Researcher, the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Ukraine, Kyiv, 42 Akademika Hlushkova Ave., nest.lubov.v@gmail.com.

Abstract

Described and is executed numerical calculation of model of time dependence of acoustic echo strength from a bottom depending on type of ground deposits, depth of a place and characteristics of the radiating antenna. The model bending around a reflected signal assumes the isotropic and Gaussian distributed bottom configuration, uniformity of a deposit in upper several meters.

Key words: echo signal, interface, directional characteristic, bottom sediments

References

1. Brekhovskikh, L.M. (ed.). *Akustika okeana*. Moscow: Nauka. 1974. (In Russian).
2. Sverdlin, G.M. *Prikladnaya gidroakustika*. Leningrad: Sudostroyeniye. 1990. (In Russian).
3. Stashkevich, A.P. *Akustika morya*. Leningrad: Sudostroyeniye. 1966. (In Russian).
4. Tyurin, A.M. *Teoreticheskaya akustika*. Leningrad: Voyenno-morskaya akademiya. 1971. (In Russian).
5. APL-UW. High-frequency ocean environmental acoustic models handbook. 1997. 210 p.
6. Bell, T.H. Statistical features of sea-floor topography. *Deep-Sea Res. Oceanogr. Abstr.* 1975. vol. 22. P. 883–892.
7. Berkson, J.M., Matthews, E. Matthews Statistical characterization of seafloor roughness. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1984. vol.9, No 1. P. 48–51.
8. Briggs, K.B. Microtopographical roughness of shallow-water continental shelves. *IEEE J. Oceanic Eng.* 1989. vol. 14. P. 360-367.
9. Chivers, R., Emerson, N., Burns, D.R. New acoustic processing for underway surveying. *Hydrographic.* 1990. vol.56. P. 9 – 17.
10. Fox, C.G., Hayes, C.E. Quantitative methods for analyzing the roughness of the seafloor. *Rev. Geophys.* 1985. vol. 23, No 1. P. 1–48.
11. Hamilton, E.L. Geoacoustic modeling of the sea floor. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. vol. 68, No 5. P. 1313–1340.
12. Hamilton, E.L., Bachman, R.T. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982. vol. 72, No 6. P. 1891–1904.
13. Ishimaru, A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Wiley-IEEE Press, 1999.
14. Ivakin, A.N., Lysanov, Y.P. Underwater sound scattering by volume inhomogeneities of a bottom medium bounded by a rough surface. *Sov. Phys. Acoust.* 1981. vol. 27, No 3. P. 212–215.
15. Jackson, D.R., Winebrenner, D.P., Ishimaru, A. Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. vol. 79. P. 1410-1422.
16. Jackson, D.R., Baird, A.M., Crisp, J.J., Thomsom, P.A.G. High-frequency bottom backscattering measurements in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.* 1986. vol. 80. P. 1188-1199.

17. Jackson, D.R., Briggs, K.B. High-frequency bottom backscattering: Roughness versus sediment volume scattering. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. vol. 92, No 2. P. 962–977.
18. Jackson, D.R., Briggs, K.B., Williams, K.L., Richardson, M.D. Test of models for high-frequency seafloor backscatter. *IEEE J. Ocean. Eng.* 1996. vol. 21, No 4. P. 458–470.
19. McDaniel, S.T., Gorman, A.D. An examination of the composite roughness scattering model. *J. Acoust. Soc. Am.* 1983. vol. 73, No 5. P. 1476–1486.
20. Moe, J.E., Jackson, D.R. Near-field scattering through and from a two-dimensional fluid–fluid rough interface. *J. Acoust. Soc. Am.* 1998. vol. 103, No 1. P. 275–287.
21. Moustier, C., Alexandrou, D. Angular dependence of 12-kHz seafloor acoustic backscatter. *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. vol. 90, No 1. P. 522–531.
22. Nesbitt, E.H. Estimation of sea bottom parameters using acoustic backscattering at vertical incidence. *Master's thesis.* University of Washington, 1988.
23. Physics of sound in the sea. National Defense Research Council. *Technical report.* National Research Council, Peninsula Publishing. Los Altos, CA, 1946.
24. Pouliquen, E., Lurton, X. Identification de la nature du fond de la mer à l'aide de signaux d'écho-sondeurs. I. Modélisation d'échos reverberés par le fond. *Acta Acust. European Acoustics Assoc.* 1994. vol. 2, No 2. P. 113–126.
25. Sternlicht, D.D., Moustier, C.P. Time-dependent seafloor acoustic backscatter (10–100 kHz). *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. vol. 114, No 5. P. 2709–2725.
26. Stockhausen, J.H. Scattering from the volume of an inhomogeneous half-space. *Report No. 63/9.* Naval Research Establishment. Canada, 1963.
27. Tsehmahman, A.S., Collins, W.T., Prager, B.T. Acoustic seabed classification and correlation analysis of sediment properties by QTC view. *Proceedings of IEEE OCEANS 97.* 1997. P. 921–926.
28. Urick, R.J. *Principles of Underwater Sound.* McGraw-Hill, New York, 1983.

Стаття надійшла 15.02.2019 р.