

О ВОЗМОЖНОСТЯХ АКУСТИЧЕСКОГО ЛУЧЕВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ

В.К. Богушевич, Л.Н. Замаренова, М.И. Скипа

*Отделение гидроакустики Морского гидрофизического института НАН Украины,
г. Одесса*

Предлагается метод, позволяющий в условиях подводного звукового канала (ПЗК) Черного моря выявлять и оценивать неоднородности морской среды посредством акустического лучевого зондирования и анализа временной структуры принимаемого сигнала, рассматриваются вопросы реализации системы зондирования и достигаемых характеристик.

The method allowing in conditions of Black sea underwater sound channel to reveal and estimate sea environment inhomogeneities by means of acoustic ray sounding and the analysis of received signal time structure is offered; questions of sounding system realization and achievable characteristics are considered.

Идеология акустической томографии предложена давно [1]. Однако практическая реализация систем наблюдения водной среды требует учета конкретных гидролого-акустических характеристик района применения. В настоящей работе разрабатываются вопросы лучевого зондирования и выявления неоднородностей в условиях ПЗК Черного моря. Рассматриваются вопросы идеологии лучевого зондирования, временной структуры принимаемого сигнала, выбора глубин размещения излучателя и приемника. Целью работы является оценка возможности реализации системы зондирования и достигаемых характеристик дальности, точности, пространственного и временного разрешения.

1 ИДЕОЛОГИЯ ЛУЧЕВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В среде с изменяющимся по глубине значением скорости звука $C(z)$ звуковая энергия распространяется по искривленным траекториям (лучам). Ход траекторий определяется выражением $\sin \theta_0 / \sin \theta(z_i) = C_0 / C(z_i)$, называемым законом рефракции. Рефрагирующий луч поворачивает в сторону меньшего $C(z)$. Поэтому в ПЗК, в котором $C(z)$ увеличивается как вверх, так и вниз от оси канала, распространение звука происходит по циклическим траекториям, характеристики которых определяются положением излучателя, углом выхода $\chi_0 = 90^\circ - \theta_0$ и профилем скорости звука (ПСЗ). Различие траекторий лучей, выходящих из источника под разными углами и заполняющих все пространство ПЗК, и различие времен распространения сигналов этих лучей можно использовать для выявления и оценивания неоднородностей, находящихся в этом озвученном пространстве. Нахождение неоднородности на трассе зондирования будет приводить к изменениям (аномалии) времени распространения, траектории и угла прихода лучей, пересекавших эту неоднородность. Проще и с большой точностью можно измерить аномалию времени распространения сигнала. Идея метода состоит в использовании коротких зондирующих сигналов и анализе временных соотношений сигналов, распространяющихся по разным траекториям и принимаемым отдельно. Зная исходную временную структуру принимаемого сигнала (ВСПС), по изменению положения на временной оси сигналов отдельных лучей можно определить те лучевые траектории, которые пересекали область с аномальными значениями скорости звука (СЗ). А зная эти аномальные траектории и их

положение в пространстве, можно определить положение и размеры неоднородности. Величину аномальности неоднородности можно определить по аномальности времени распространения t_p сигналов и длине аномальных участков траекторий им соответствующих лучей.

В случае локальных неоднородностей, горизонтальный размер которых меньше максимальной длины цикла траектории $L < D_{ц\max}$, можно определить их положение на трассе зондирования и горизонтальный и вертикальный размеры. Достигается это с помощью лучевой реконструкции. Построение траекторий лучей, имеющих аномалию времени распространения, позволяет определить место расположения неоднородности – участок трассы, на котором лучи находятся в малом интервале глубин (область сгущения аномальных траекторий). Лучевые траектории, не имеющие аномалии времени распространения, в месте расположения неоднородности очерчивают область, свободную от не аномальных лучей (область разрежения). Границы этой области по дальности и глубине и будут определять внешние границы неоднородности.

В случае протяженных неоднородностей ($L > D_{ц\max}$) можно определить положение их верхних и нижних границ ($z_{г.г}$ и $z_{н.г}$). Такое определение основывается на изменении степени аномальности времени распространения t_p по мере изменения глубины заворота z_{mi} лучевой траектории. В случае $z_{mi} < z_{г.г}$ аномалия t_p отсутствует. Если $z_{mi} > z_{г.г}$ появляется аномалия t_p , которая тем больше, чем больше z_{mi} . При $z_{mi} > z_{н.г}$ аномалия t_p начинает уменьшаться. Первая, по мере увеличения z_{mi} , лучевая траектория, обнаруживающая появление аномалии t_p , и будет определять верхнюю границу неоднородности ($z_{mi} > z_{г.г}$). А первая лучевая траектория, обнаруживающая уменьшение аномалии t_p , будет определять нижнюю границу неоднородности ($z_{mi} > z_{н.г}$).

В задаче лучевого зондирования должно обеспечиваться однозначное соответствие времен прихода сигналов t_p лучевым траекториям, по которым они распространялись ($D_{ц}$, z_{mi} , χ_0). В идеализированных волноводах (линейный ППЗК и билинейный ПЗК) это соответствие для траекторий с целым числом циклов $N = r/D_{ц}$ выполняется для любых r и z_m , и определяется соотношениями [2]:

$$D_{ц} = 2tg\chi_0/a \approx 2\chi_0/a, \quad z_m = \chi_0^2/2a, \quad t_{p(r,N)} \approx (r/C_0)(1 - a^2 \cdot r^2/24N^2), \quad (1)$$

где $a = \Delta C/\Delta z \cdot C_0$ - относительный градиент скорости звука, для билинейного ПЗК a находится из соотношения $1/a = 1/a_1 + 1/a_2$.

Здесь увеличение $D_{ц}$ и z_m , вызываемое увеличением χ_0 , приводит к уменьшению N и t_p . В случае реальных профилей СЗ однозначность соответствия может нарушаться, и увеличение z_m не будет приводить к уменьшению t_p . В работе [3] показано, что для всех

возможных ПСЗ Черного моря и расстояний $r \leq 100$ км однозначность соответствия t_p , D_u , z_m обеспечивается при $z_m > 100 \dots 120$ м, т.е. для глубин, где градиенты СЗ минимальны. Эти глубины и определяют используемые в предлагаемом методе лучевые траектории, минимальную глубину размещения излучателя и приемника.

Функционирование системы зондирования требует отдельного приема сигналов отдельных лучей. Для идеализированных волноводов интервал времени ϑ между сигналами лучей с целым числом циклов N и $N + 1$ определяется [2]:

$$\vartheta_{(N)} = t_{(r,N+1)} - t_{(r,N)} = (a^2 \cdot r^3 / 24C_0) \cdot (2N + 1) / (N + 1)^2 \cdot N^2. \quad (2)$$

Выражение (2) определяет зависимость интервала θ от числа циклов траекторий. А так как в однозначных волноводах сигналы приходят в порядке возрастания числа циклов их траекторий, то это будет зависимость временного интервала от порядкового номера приходящего сигнала. Таким образом, выражение (2) определяет временную структуру принимаемого сигнала. Для достаточно больших расстояний, когда минимальное число циклов велико ($N_{\min} \geq 15$) и $(2N + 1) / (N + 1)^2 \cdot N^2 \approx 2 / N^3$, выражение (2) упрощается:

$$\vartheta_{(N)} = a^2 \cdot r^3 / 12 \cdot C_0 \cdot N^3 = a^2 D_u^3 / 12 C_0. \quad (3)$$

В работе [3] показано, что это выражение применимо и в случае реальных профилей, если $z_m \geq 200$ м, и может использоваться для приближенных оценок, если $z_m \geq 130$ м.

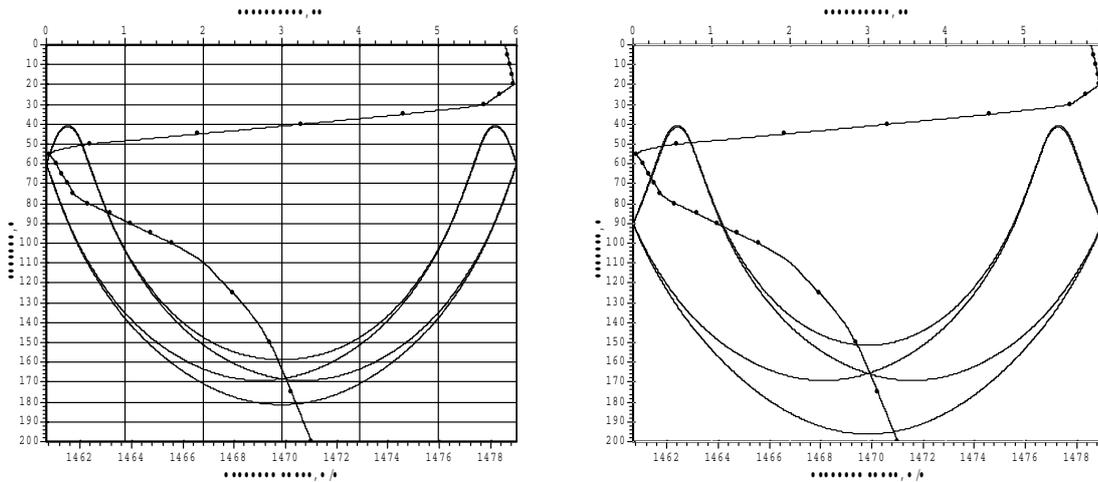
Учитывая выражения (1), из (3) можно получить зависимость интервала времени ϑ от глубин заворота лучевых траекторий (с целым числом циклов):

$$\vartheta_{(z_m)} = 4\sqrt{2a} \cdot z_m^{3/2} / 3C_0. \quad (4)$$

Интервал времени между двумя последовательно приходящими сигналами возрастает с увеличением глубин заворота их траекторий по закону $z_m^{3/2}$. Из этого следует, что легче производить отдельный прием сигналов, лучевые траектории которых заворачивают на большей глубине. Для глубин 200, 300 и 400 м и реального ПСЗ рассчитанные значения интервала времени будут следующими: $\vartheta_{(z=200)} = 13,6$ мс, $\vartheta_{(z=300)} = 25,1$ мс, $\vartheta_{(z=400)} = 38,6$ мс.

Полученные соотношения (2), (4) и приведенные цифры интервалов времени между сигналами соответствуют лучам с целым числом циклов. Фактически же между точками излучения и приема ($z_u = z_{np}$) существуют лучевые траектории как с целым, так и с нецелым числом циклов, что меняет представление о ВСПС. Существует четыре типа разрешенных лучей, определяемых соотношением углов выхода и прихода. К первому типу относятся лучи, выходящие из излучателя вниз и приходящие в точку приема сверху ($\chi_{\text{вых}} > 0$, $\chi_{\text{прих}} > 0$, +/+). Ко второму типу относятся лучи, выходящие вверх и приходящие снизу (-/-). Эти два типа лучей имеют одинаковые, зеркально расположенные, траектории с целым числом циклов и одинаковое время распространения сигналов. При изменении глубин излучателя и приемника ($z_u = z_{np}$, $r = \text{const}$) для них остаются неизменными глубина заворота, расстояние по лучу и время распространения (рис. 1).

К третьему типу относятся лучи, выходящие из излучателя вниз и приходящие в точку приема снизу (+/-). Число циклов их траекторий ($z_u = z_{np}$) несколько меньше целого, глубина заворота больше, а время распространения сигналов меньше, чем в случае первых двух типов лучей. К четвертому типу относятся лучи, выходящие вверх и приходящие сверху (-/+). Число циклов их траекторий ($z_u = z_{np}$) несколько больше целого, глубина заворота меньше, а время распространения сигналов больше, чем в случае первых двух типов лучей. Для этих типов лучей при изменении глубин излучателя и приемника ($z_u = z_{np}$, $r = const$) изменяются глубины их заворота, число циклов, расстояние по лучу и время распространения (рис. 1).



- | | |
|---|---|
| 1 - $\chi = +6,34^\circ$, $N_u = 1,0$, 162,2 м, $t_p = 4,0934$ с; | 1 - $\chi = +5,22^\circ$, $N_u = 1,0$, 169,2 м, $t_p = 4,0934$ с; |
| 2 - $\chi = -6,34^\circ$, $N_u = 1,0$, 162,2 м, $t_p = 4,0934$ с; | 2 - $\chi = -5,22^\circ$, $N_u = 1,0$, 162,2 м, $t_p = 4,0934$ с; |
| 3 - $\chi = +6,47^\circ$, $N_u = 0,915$, 181,4 м, $t_p = 4,0910$ с; | 3 - $\chi = +5,57^\circ$, $N_u = 0,844$, 196,2 м, $t_p = 4,0866$ с; |
| 4 - $\chi = -6,22^\circ$, $N_u = 1,100$, 158,8 м, $t_p = 4,0957$ с. | 4 - $\chi = -4,96^\circ$, $N_u = 1,231$, 151,3 м, $t_p = 4,0999$ с. |

Рис. 1

Таким образом, в интервал времени $\theta_{(z)}$ ($\theta_{(N)}$) попадают четыре сигнала четырех типов разрешенных лучей. При практической реализации системы зондирования важным является обеспечение равенства интервалов Δt_i между этими сигналами. Задание интервалов Δt_i можно обеспечить за счет соответствующего выбора глубин размещения излучателя и приемника z_u и z_{np} . Необходимый интервал между сигналами лучей третьего и четвертого типов можно получить, задавая соответствующие $z_u = z_{np}$. По мере увеличения $z_u = z_{np}$ $\Delta t_{3,4}$ будет увеличиваться. Глубину размещения z_u и z_{np} необходимо выбирать так, чтобы обеспечивалось $\Delta t_{3,4} = (3/4) \cdot \vartheta_{(z_m)}$. Сигналы лучей первого и второго типов при $z_u = z_{np}$ имеют одинаковое время распространения $t_{p1} = t_{p2}$. Их разделение во времени обеспечивается заданием $z_u \neq z_{np}$. Достижимый при

этом временной сдвиг примерно пропорционален разнице глубин $\Delta t_{1,2} \sim \Delta z = z_u - z_{np}$. Временной сдвиг $\Delta t_{1,2}$ зависит также и от самих значений z_u и z_{np} ($\Delta z = const$), увеличиваясь при их приближении к оси канала. Разницу глубин Δz необходимо выбирать так, чтобы обеспечивалось $\Delta t_{1,2} \approx \vartheta_{(z_m)} / 4$. При этом должно обеспечиваться $\Delta t_{3,1} \approx \Delta t_{1,2} \approx \Delta t_{2,4}$. Подробнее вопросы выбора глубин размещения излучателя и приемника рассмотрены в [3]. Выбор z_u и z_{np} для трассы с конкретным ПСЗ можно осуществить с помощью диаграмм временных интервалов и расчетов на ЭВМ задач распространения [3].

Из-за несимметричности изменений t_{p3} и t_{p4} , t_{p1} и t_{p2} при изменениях z_u и z_{np} , условие $\Delta t_{3,1} = \Delta t_{1,2} = \Delta t_{2,4}$ выполняется только приближенно. Но различия этих временных интервалов могут быть невелики. Проведенные расчеты для четырех характерных ПСЗ показали, что для $z_m \geq 120$ м при $\vartheta_{(z_m)} = 6,3$ мс при оптимальном выборе z_u и z_{np} достигаемой является величина $\Delta t_{\min} \geq 1,5$ мс.

2 ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА И ДОСТИГАЕМЫЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Возможности применения предлагаемого метода лучевого зондирования рассмотрим на примере неоднородностей, образующихся в районе материкового склона. Там, где поток Основного черноморского течения натывается на преграду – свал глубин, происходит подъем нижележащих более соленых и более теплых вод. Это приводит к образованию аномальных областей с повышенным значением скорости звука. Аномалии, как правило, располагаются на горизонтах 100...150 м, их ширина достигает 15...30 м, а экстремум скорости звука превышает фон от 0,3 до 3,0 м/с [4]. Для определенности рассмотрим неоднородность с вертикальным размером от 15 до 30 м, горизонтальным размером от 2 до 5 км, глубиной нахождения от 120 до 150 м при глубине моря в районе зондирования $H_m = 200$ м. Расчеты показывают, что при всех реальных профилях СЗ длина аномальных участков траекторий, пересекающих указанную неоднородность, будет иметь значение не менее 0,3...0,6 км. При принимаемом значении аномалии СЗ в неоднородности 3,0 м/с аномалия времени распространения на участках траекторий указанной протяженности будет превышать 0,4...0,8 мс.

Практическая реализация метода лучевого зондирования требует решения двух основных проблем – разделение во времени сигналов отдельных лучей (при $\Delta t_{\min} \geq 1,5$ мс) и обеспечение необходимой точности измерения времени прихода этих сигналов (при аномальности Δt_a до 0,4...0,8 мс). Для обеспечения раздельного приема сигналов лучей, имеющих разницу времени распространения Δt_{pi} , полоса приема и полоса частот зондирующего сигнала должны быть больше величины, обратной Δt_{pi} , т.е. $\Delta f_{np} \approx F_c > 1 / \Delta t_{pi}$. При $\Delta t_{\min} \geq 1,5$ мс полоса частот сигнала должна составлять не менее $F_c \geq 660$ Гц (примем $F_c = 750$ Гц). Принимая $F_c = 25\%$ от f_c , будем иметь $f_c = 3,0$ кГц.

Потенціальна точність вимірювання часу приходу сигналу залежить від частоти F_c і відношення енергії сигналу до спектральної густоти потужності шуму $2E/N_0$:

$$\sigma_\tau = 1/F_c \cdot \sqrt{2E/N_0}. \quad (5)$$

Ураховуючи, що $E = P_c \cdot T_c$, де P_c - потужність сигналу, T_c - його тривалість, а $N_0 = P_u / \Delta f_u$, де P_u - потужність шуму в смузі, а $\Delta f_u = \Delta f_{np}$ - смуга прийому, що $\Delta f_{np} \approx F_c$, і $2E/N_0 \approx 2F_c \cdot T_c \cdot P_c / P_u = 2F_c \cdot T_c \cdot U_c^2 / U_u^2$, і що найменше значення бази сигналу (с гауссовою огибаючою) $B = 2F_c \cdot T_c \geq 2\pi$, вираження (5) можна привести до виду:

$$\sigma_\tau \leq 0,4 \cdot U_u / U_c \cdot F_c. \quad (6)$$

При розрахунках характеристик системи акустическа потужність випромінюваного сигналу приймається $P_a = 400$ Вт, напрямленість випромінювача $K_p = 3,0$, тиск на його осі на відстані 1 м - $p = 20 \cdot 10^3$ Па. При відстані $r = 50$ км, частоті $f_c = 3,0$ кГц, значенні коефіцієнта затухання $\beta = 0,17$ дБ/км, спектральному рівню шуму моря $0,40$ мПа/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при швидкості вітру $v = 10$ м/с і $0,20$ мПа/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при $v = 5$ м/с, смузі прийому $\Delta f_{np} = F_c = 750$ Гц відношення сигнал/шум в точці прийому становить $p_c / p_u = U_c / U_u = 13,8$ (27,6). В цьому випадку при використанні простих сигналів $\sigma_{\tau(r=50)} = 0,04$ мс при $v = 10$ м/с і $\sigma_{\tau(r=50)} = 0,02$ мс при $v = 5$ м/с. При збільшенні відстані з 50 до 100 км втрати збільшаться в 5,32 рази, а відношення с/ш в точці прийому становитимуть 2,6 при $v = 10$ м/с і 5,2 при $v = 5$ м/с. В цьому випадку будемо мати $\sigma_{\tau(r=100)} = 0,20$ (0,10) мс. Далі збільшення відстані і збільшення втрат зроблять неможливим прийом простих сигналів.

Більшу довжину траси зондування можна забезпечити при великих глибинах знаходження неоднорідності. Так зміщення верхньої межі її можливого знаходження з 120 до 170 м збільшує потрібний інтервал Δt_{\min} з 1,5 до 2,7 мс, що дозволяє прийняти $F_c = 370$ Гц і $f_c = 1,5$ кГц. В цьому випадку зменшення коефіцієнта затухання до 0,10 дБ/км і зменшення Δf_{np} і P_u приведуть до збільшення дальності до 160 км.

При вказаних вище точностях вимірювання часу приходу сигналу $\sigma_{\tau(r=50)} = 0,04$ (0,02) мс і $\sigma_{\tau(r=100)} = 0,20$ (0,10) мс і аномалії часу поширення сигналу $0,4 \dots 0,8$ мс точність вимірювання вертикального розміру неоднорідності становитиме $0,4$ (0,2) м для $r = 50$ км і $2,0$ (1,0) м для $r = 100$ км. Визначення положення неоднорідності і її горизонтального розміру забезпечується з точністю, визначеною геометрією променевого поширення, до тих пор, поки $\Delta t_{a\min} = 0,4 \dots 0,8 \text{ мс} > \sigma_\tau$, т.е. для відстаней 100 км і більше. На менших відстанях існуючий запас точності вимірювання часу приходу сигналу дозволяє виявляти і оцінювати неоднорідності з значно меншими, ніж 3,0 м/с, значеннями аномалії (вплоть до $\Delta C_a \leq 0,08$ м/с при $r = 50$ км).

ВЫВОДЫ

1. Применительно к условиям ПЗК Черного моря разработана идеология акустического лучевого зондирования и выявления и оценивания неоднородностей морской среды, даны рекомендации по реализации системы зондирования, показана возможность ее практической применимости.

2. Показано, что достигаемое временное разрешение системы зондирования составляет 0,04 мс и 0,02 мс на расстоянии 50 км и 0,20 мс и 0,10 мс на расстоянии 100 км, что позволяет выявлять локальные неоднородности с вертикальным размером 30 м с аномалиями значения скорости звука до 0,08 м/с и 0,38 м/с, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *W. Munk, C. Wunsch.* Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring// Deep-Sea Res. –1978. – **26A**. – P.123-161.
2. *Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов.* Акустика океана.// Физика океана. Гидродинамика океана. Т. 2/ Под ред. В.М. Каменковича, А.С. Моница. – М.: Наука, 1978. – С. 49-145.
3. Исследовать процессы распространения и рассеяния гидроакустических сигналов в ПЗК и ППЗК с целью решения задач выявления динамических образований: Отчет о НИР/ ОГА МГИ НАНУ. – №ГР0199U001197; Инв. №148. – Одесса, 2003. – 420 с.
4. *Дивизинюк М.М.* Акустические поля Черного моря. – Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАНУ, 1998. – 351 с.