

УДК 551.463.224: 534.222

© И. И. Микушин, Г. Н. Серавин

Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург
namik0875@mail.ru**ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
СКОРОСТИ ЗВУКА В МОРЕ**

Статья поступила в редакцию: 14.04.2016, после доработки: 06.11.2016.

Задача определения характеристик морской среды по зафиксированным значениям излученных и принятых отраженных акустических сигналов от различных рассеивателей без непосредственного измерения самих характеристик корабельными погружающимися зондами является актуальной и востребованной. Оценка влияния вертикального распределения скорости звука от поверхности до дна в морском волноводе производится непосредственно перед использованием различной гидроакустической аппаратуры. Возможность использования информации, заложенной в принятом отраженном от цели акустическом сигнале, для получения характеристик о морской среде может значительно упростить характер эффективного использования судовой гидроакустической аппаратуры. В работе рассматриваются алгоритмы решения обратных задач восстановления вертикального распределения скорости звука при зондировании с судна акустических рассеивателей звука в водной среде естественного происхождения, относительно крупных одиночных или многочисленных мелких, находящихся в объеме, ограниченном характеристиками направленности судовых антенн, поверхностью моря и дном. Показано, что наиболее приемлемым для практического использования является алгоритм восстановления вертикального распределения скорости звука способом линеаризации при зондировании в водной среде с судна одиночных рассеивателей звука, имеющих размеры более одной длины волны излучаемого сигнала.

Ключевые слова: скорость звука, дистанционный акустический метод, обратная задача.*I. I. Mikushin, G. N. Seravin*

Military Training and Research Center of Navy «Naval Academy», St.-Petersburg, Russia

**RETURN PROBLEMS OF RESTORATION
OF SOUND SPEED VERTICAL DISTRIBUTION IN THE SEA**

Received: 14.04.2016, in final form: 06.11.2016.

The problem of determining of the marine environment characteristics by fixed values of the emitted and reflected acoustic signals, received from different scatterers without direct characteristics measurement with ship dipping probes, is relevant and useful. Impact assessment of the vertical sound velocity distribution in the waveguide from the surface to the sea bottom is made immediately prior to use of various hydroacoustic equipment. The usability of information contained in the received acoustic signal, reflected from the target, to obtain the marine environment characteristics, can significantly simplify the nature of the efficient use of acoustic ship equipment. This work studies solution algorithms of return problems of restoration of sound speed vertical distribution while sounding from the ship in water medium acoustic sound diffuser, relatively big single or multiple small, in the volume, limited by characteristics of antenna directivity, sea surface and sea bottom. It is shown that the more acceptable (for practical use) is the algorithm of restoration of sound speed vertical distribution with the method of linearization while sounding on the move in the sea medium single sound diffusers, having dimensions more than a radiated signal wavelength.

Key words: Sound speed, remote acoustic method, return problem.

Общие положения. В акустике океана обратные задачи — это задачи определения характеристик морской среды по параметрам принятых акустических сигналов, источника и приемников. Решение обратных задач всегда базируется на прямых задачах акустики океана определении влияния на параметры распространяющихся акустических сигналов характеристик морской среды и ее границ, параметров акустических источника и приемников.

Ссылка для цитирования: Микушин И. И., Серавин Г. Н. Обратные задачи восстановления вертикального распределения скорости звука в море // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 4. С. 73—84.

For citation: Mikushin I. I., Seravin G. N. Return problems of restoration of sound speed vertical distribution in the sea. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 4, 73—84.

В настоящей работе рассматриваются алгоритмы решения обратных задач восстановления вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) при зондировании с судна в море акустических рассеивателей звука относительно крупных одиночных или многочисленных мелких, находящихся в объеме, ограниченном характеристиками направленности антенн, а также при зондировании поверхности и дна.

В математическом отношении большинство обратных задач восстановления ВРСЗ в лучевой акустике сводится к решению следующего нелинейного интегрального уравнения первого рода [1]

$$\int_{\Gamma(\alpha)} \frac{ds}{C(Z)} = t(\alpha), \quad Z(\alpha) \approx D_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где $\Gamma(\alpha)$ — траектория распространения акустического сигнала; ds — элемент траектории; $C(Z)$ — вертикальное распределение скорости звука; $t(\alpha)$ — время распространения сигнала по траектории $\Gamma(\alpha)$; α — угол скольжения луча.

В известных дистанционных акустических методах определения ВРСЗ преимущественно используется бистатистическая схема зондирования морской среды (рис. 1), в которой акустический источник 1 расположен на одном горизонте с акустическим приемником 2, удаленном от источника на расстояние D_0 .

Акустический сигнал распространяется по лучу $\Gamma_1(\alpha_1)$, выходящему из источника под углом α_1 . На горизонте $\Gamma(\alpha)$ акустический сигнал отражается от акустического рассеивателя P_z , распространяется по лучу $\Gamma_2(\alpha_2)$ и приходит к приемнику под углом α_2 , то есть $\Gamma(\alpha) = \Gamma_1(\alpha_1) + \Gamma_2(\alpha_2)$. В данной ситуации параметрами акустического источника и приемника являются D_0 , α_1 и α_2 , параметром принятого сигнала $t(\alpha)$, характеристикой морской среды — скорость звука C на горизонте Z .

В работе [2] показано, что решение уравнения (1) для бистатистической схемы зондирования существует, и оно единственное при следующих условиях:

- 1) $0 < \alpha_1 \leq \pi/2$, $0 < \alpha_2 < \pi/2$;
- 2) $D_0 = \text{const}$, $\alpha_1 = \text{const}$, $\alpha_2 = \text{var}$;
- 3) $D_0 = \text{const}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \text{var}$;
- 4) $D_0 = \text{var}$, $\alpha_1 = \text{const}$, $\alpha_2 = \text{const}$.

В развернутом виде соотношение (1) для бистатистической схемы зондирования может быть представлено в следующих основных вариантах:

$$1) \sum_{k=1}^2 \int_0^{Z(\alpha)} \frac{n^2(Z) dZ}{\sqrt{n^2(Z) - \cos^2 \alpha_k}} = t(\alpha) C_0, \quad (2)$$

где $Z(\alpha)$ определяется из условия

$$\cos \alpha_k \int_0^{Z(\alpha)} \frac{dZ}{\sqrt{n^2(Z) - \cos^2 \alpha_k}} = D_0.$$

Здесь C_0 — скорость звука на горизонте источник-приемник; $n(Z) = C_0/C(Z)$ — акустический показатель преломления морской воды; $k = 1$ — луч, выходящий из источника; $k = 2$ — луч, приходящий к приемнику.

$$2) \sum_{k=1}^2 \int_0^{Z(\alpha)} n(Z) \sqrt{1 + (y'_k)^2} dz = C_0 \cdot t(\alpha_k), \quad (3)$$

где y'_k — производная функции y_k — траектории распространения сигнала по лучу k .

Соотношения (2) и (3) используются в лучевой акустике в прямых задачах определения при известном ВРСЗ — $C(Z)$ времени t и дистанции D распространения акустических сигналов в море.

Результаты решений уравнений (2) и (3) относительно $C(Z)$ классическими способами [2] являются крайне неустойчивыми — при незначительных погрешностях в исходных данных D_0 , α_k , $t(\alpha_k)$ имеют место недопустимо большие ошибки восстановления $C(Z)$. Поэтому были предложены специальные, более устойчивые и точные способы решения обратных задач восстановления искомого ВРСЗ, то есть решений нелинейных интегральных уравнений (2) и (3): дискретизации, линеаризации и приближенного дифференцирования.

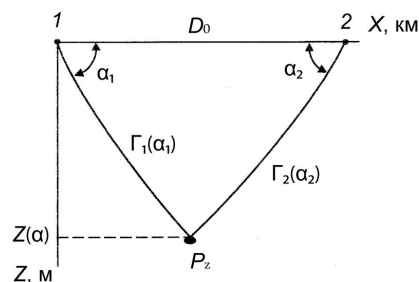


Рис. 1. Бистатистическая схема зондирования морской среды.

В алгоритмах решения обратной задачи восстановления ВРСЗ способом «параллельных звуковых лучей» и при зондировании границ водной среды — ее поверхности и дна, соотношения (1)—(3) не используются.

Решение обратных задач при акустическом зондировании водной среды

Способ дискретизации. В способе дискретизации в соотношении (2) производят аппроксимацию искомой функции $C(Z)$ отрезками в водной среде, представленной в виде слоев $1, \dots, i, \dots, n$ с постоянными вертикальными градиентами G_i скорости звука. Способ заключается в последовательном решении обратной задачи по слоям от горизонта источник-приемник с использованием результатов решений для предыдущих слоев.

В работе [3] было получено решение интегрального уравнения (2) для наиболее распространенной прямоугольной схемы зондирования водной среды в виде алгебраического уравнения (4). В этой схеме акустические сигналы распространяются от горизонта источник-приемник по вертикали и после рассеивания от неоднородности водной среды возвращаются на этот горизонт по наклонной траектории, или наоборот — распространяются от горизонта источник-приемник по наклонным траекториям, а возвращаются к нему по вертикали, то есть когда $\alpha_1 = \pi/2$, $\alpha_2 = \alpha_1 = \text{var}$ или $\alpha_2 = \pi/2$, $\alpha_1 = \alpha_j = \text{var}$, а акустические рассеиватели P_z находятся на границах слоев по вертикали от источника или приемника:

$$\frac{Z_i}{2 \cdot C_{i-1} (X_i - 1)} \cdot \ln \left(X_i^2 \frac{1 - \sqrt{1 - (X_i \cos \alpha_j)^2}}{1 + \sqrt{1 - (X_i \cos \alpha_j)^2}} \cdot \frac{1 + \sin \alpha_j}{1 - \sin \alpha_j} \right) = t_i. \quad (4)$$

Это выражение можно преобразовать в более компактное:

$$\frac{Z_i}{C_{i-1} (X_i - 1)} \cdot \ln \left(\frac{1 - \sqrt{1 - (X_i \cos \alpha_j)^2}}{1 - \sin \alpha_j} \right) = t_i.$$

Здесь $X_i = C_i / C_{i-1}$, для морской среды $0.95 \leq X_i \leq 1.05$; C_i и C_{i-1} — скорость звука на нижней и верхней границе слоя соответственно; в первом слое $C_{i-1} = C_0$ — скорости звука на горизонте акустического излучателя и приемника, которая измеряется с большой точностью контактным методом; Z_i — толщина i -го слоя; α_j — угол выхода луча из верхней границы слоя; t_i — общее время распространения акустического сигнала в слое по лучам 1 и 2.

Расстояние D_p пройденное лучом в слое по оси абсцисс, равно $D_i = Z_i \cdot \text{ctg} \left\{ \left[\alpha_j + \arccos(X_i \cdot \cos \alpha_j) \right] / 2 \right\}$.

Уравнение (4) решается относительно X_i численными методами. Далее находится скорость звука C_i на нижней границе слоя $C_i = X_i \cdot C_{i-1}$.

В работе [3] приведены результаты численных экспериментов по восстановлению ВРСЗ способом дискретизации для прямоугольной схемы зондирования при наличии случайных погрешностей в исходных данных по времени Δt (равномерный закон распределения). Использование результатов решений в предыдущих слоях приводит к изменению знака погрешности определения скорости звука на границах слоев и к непрерывному ее увеличению по абсолютной величине. Удовлетворительные результаты были получены до глубины 200 м при $D_0 = 50$ м, $\Delta t \leq 10^{-4}$ с при количестве слоев $N < 20$, когда их горизонты были близки к горизонтам искомого ВРСЗ, что предполагает наличие априорной информации об определяемом ВРСЗ в море. На рис. 2 представлены результаты численных экспериментов по восстановлению двух ВРСЗ. Линиями на них изображены искомые ВРСЗ, крестиками — точки их восстановленных значений.

Способ линеаризации. Решение уравнения (1) в варианте (3) способом линеаризации было впервые изложено в докладе [4]. Функции в уравнении (3) представлялись в виде

$$\begin{aligned} n(Z) &= C_0 / C(Z) = 1 + \varepsilon \cdot n_1 + \varepsilon^2 \cdot n_2 + \dots, \\ y_k(Z, \alpha_k) &= y_0(Z, \alpha_k) + \varepsilon \cdot y_1(Z, \alpha_k) + \varepsilon^2 \cdot y_2(Z, \alpha_k) + \dots, \\ t(\alpha_k) &= t_0(\alpha_k) + \varepsilon \cdot t_1(\alpha_k) + \varepsilon^2 \cdot t_2(\alpha_k) + \dots, \\ Z(\alpha) &= Z_0(\alpha) + \varepsilon \cdot Z_1(\alpha) + \varepsilon^2 \cdot Z_2(\alpha) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

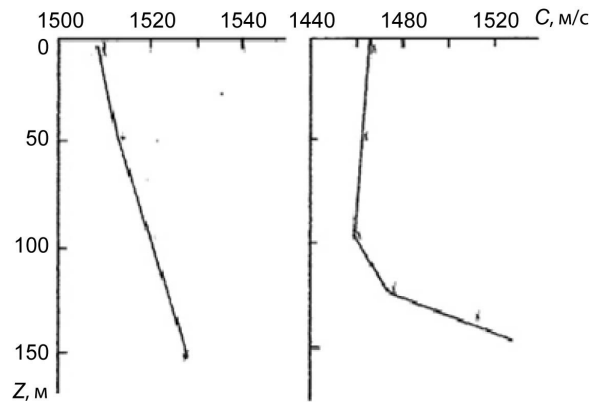


Рис. 2. Восстановление BPC3 способом дискретизации при $\Delta t \leq 10^{-4}$ с.

Слагаемые с величинами ε^2 малого порядка отбрасывались, то есть исходные функции линеаризировались. После подстановки функций (5) в уравнение (3) и проведения достаточно трудоемких преобразований был получен для прямоугольной схемы зондирования водной среды следующий алгоритм восстановления искомого BPC3

$$\alpha_1 = \pi/2, \alpha_2 = \alpha = \text{var},$$

$$C(\alpha) = C_0 / \left\{ 1 + \frac{C_0 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{D_0 \cdot (1 + \sin \alpha)^2} \cdot \left[\frac{2 \cdot \cos \alpha \cdot (t(\alpha) - t_0)}{1 + \sin \alpha} + \sin \alpha \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} (t(\alpha) - t_0)' \right] \right\}, \quad (6)$$

где $t_0 = D_0 \cdot (1 + \sin \alpha) / (C_0 \cdot \cos \alpha)$. Горизонт каждого рассеивателя $Z(\alpha) \approx D_0 \cdot \text{tg} \alpha$.

В данном случае акустические рассеиватели $P_{zi} = P_i(\alpha)$ находятся по вертикали от источника. При определении по соотношению (6) скорости звука у данного рассеивателя в отличие от способа дискретизации в принципе не требуется использование результатов предыдущих решений. Для определения скорости звука $C(\alpha_i)$ на горизонте $Z(\alpha_i)$ у рассеивателя $P_i(\alpha)$ достаточно знание значений C_0 , D_0 , времени прихода к приемной антенне акустического сигнала $t(\alpha_i)$ и производной времени по углу $t'(\alpha_i)$, то есть времен прихода принятых сигналов в окрестности угла α_i .

В работах [4, 5] при проведении численных экспериментов по решению обратной задачи восстановления BPC3 способом линеаризации с учетом случайной (равномерный закон распределения) погрешности времен прихода акустических сигналов Δt . При этом искомые $C(Z)$, исходные значения $t_i(\alpha_i)$ и вычисленные производные $t'_i(\alpha_i)$ обрабатывались сглаживающими сплайнами.

На рис. 3 приведены примеры из этих работ по восстановлению BPC3 для прямоугольной схемы зондирования $D_0 = 75$ м при $\Delta t = 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-3} с. Сплошные кривые соответствуют искомому BPC3, цифрами обозначены восстановленные $C(Z)$.

Было показано, что при отсутствии погрешностей в исходных данных восстановленные BPC3 совпадают с искомыми до глубины 200—250 м. В целом при наличии случайных погрешностей $\Delta t < 10^{-3}$ с восстановленные $C(Z)$ в основном правильно отображают конфигурацию кривых искомого BPC3 при количестве исходных значений $t_i(\alpha_i)$ $N > 20$. Более удовлетворительные результаты были получены при $\Delta t \approx < 5 \cdot 10^{-4}$ с. В работах [4, 5] не приводятся программы для ЭВМ численного решения обратной задачи восстановления искомого BPC3.

Для проведения собственных численных экспериментов восстановления искомого BPC3 по алгоритму (6) нами совместно с А. П. Пономаренко была разработана такая программа (GIDR) с введением случайных погрешностей в исходных данных по времени Δt (равномерный закон распределения), а также процедур обработки данных $(t(\alpha) - t_0)$, $\frac{\partial}{\partial \alpha} (t(\alpha) - t_0)$ и результатов вычислений $C(\alpha)$ сглаживающими сплайнами.

В качестве примеров, демонстрирующих работу программы GIDR, на рис. 4 приведены графики реальных (сплошные кривые) и обозначенные цифрами восстановленные BPC3 для прямоугольной схемы зондирования при $D_0 = 50$ м, $N \approx 30$, $\Delta t = 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-5}$ и 10^{-4} с.

На рис. 4, а реальным является линейное BPC3 с вертикальным градиентом скорости звука $G = 0.02$ с $^{-1}$. На рис. 4, б представлен реальный, измеренный в средней Атлантике BPC3. Было выявлено,

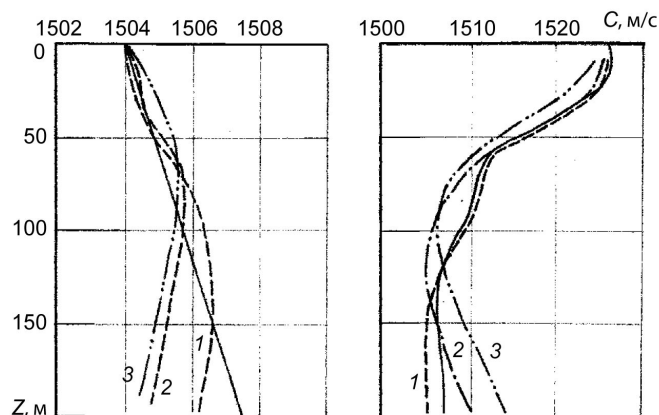


Рис. 3. Восстановление ВРСЗ способом линеаризации при Δt .
 $1 — 10^{-4}$ с; $2 — 5 \cdot 10^{-4}$ с; $3 — 10^{-3}$ с.

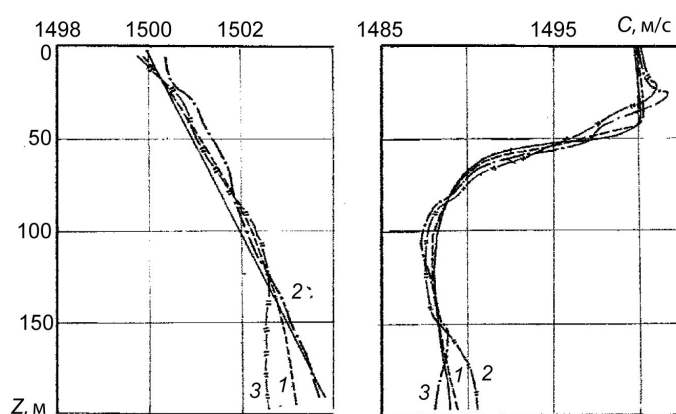


Рис. 4. Восстановление ВРСЗ способом линеаризации при Δt .
 $1 — 10^{-5}$ с; $2 — 5 \cdot 10^{-4}$ с; $3 — 10^{-4}$ с.

что решение обратной задачи с использованием программы GIDR дает при тех же исходных данных одинаковые результаты с работами [4, 5].

Численные эксперименты показывают, что для получения удовлетворительной точности восстановления ВРСЗ необходимо иметь исходную погрешность времени $\Delta t < 5 \cdot 10^{-4}$ с. Были выявлены некоторые особенности способа линеаризации. Чем больше значения погрешностей исходных данных, тем значительнее отличия восстановленных ВРСЗ от искомым, особенно на горизонтах свыше 100 м. Более неудовлетворительно восстанавливаются части ВРСЗ линейные и с резкими перегибами.

Существенным недостатком предложенных в работах [3—5] алгоритмов является ограниченность их применения только для одной схемы зондирования морской среды — прямоугольной, которая на практике не осуществима. Для этого необходимо расположение всех акустических рассеивателей на оси характеристики направленности (ХН) излучающей антенны, вероятность чего ничтожно мала.

Как показано в работе [6], при $D_0 \approx 75$ и растворе ХН излучателя $2\theta \approx 1^\circ$ из-за смещения рассеивателей к краям ХН могут иметь место дополнительные методические погрешности по углу α_1 до $\Delta\alpha_{1M} \approx \pm\theta$ и времен прихода акустических сигналов до $\Delta t_M \approx \pm 7 \cdot 10^{-3}$ с. Это делает практически невозможным использование рассмотренных выше способов решения обратных задач восстановления ВРСЗ в дистанционной акустической импульсной аппаратуре с прямоугольной схемой зондирования водной среды, например, по изобретениям [7—9].

Позднее, в статье [10] был предложен вариант решения обратной задачи восстановления искомого ВРСЗ способом линеаризации для любых углов α_1 и α_2 бистатистических схем зондирования морской среды. Суть предложенного способа заключается в следующем. При выводе конечных формул соотношение (1) представляется в виде

$$t(\alpha_k) = \sum_{k=1}^2 \int_0^Z \frac{dH}{C_0 \cdot \cos \alpha_k \sqrt{[1 - \eta(H)] \cdot [\operatorname{tg}^2 \alpha_k + \eta(H)]}}, \quad (7)$$

где $\eta(H) = 1 - [C(H) / C_0]^2$, H — переменная интегрирования, а Z определяется из соотношения

$$\sum_{k=1}^2 \int_0^Z \left[\frac{1 - \eta(H)}{\operatorname{tg}^2 \alpha_k + \eta(H)} \right]^{1/2} dZ = D_0. \quad (8)$$

При допущении, что $|\eta| \ll 1$ и $|\eta| \ll \operatorname{tg}^2 \alpha_k$ разлагают правые части выражений (7) и (8) в ряд по степеням малых $|\eta|$ и $|\eta|/\operatorname{tg}^2 \alpha$ и, ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получают систему из двух уравнений. В результате ее решения получают следующие соотношения

$$C(Z) = C_0 \left[1 - \frac{\partial I(Z)}{\partial Z} \right], \quad (9)$$

$$\text{где } I(Z) = 2 \frac{\sin^2 \alpha_1 \cdot \sin^2 \alpha_2 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) [1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]^2} \cdot C_0 [t(\alpha) - t_0],$$

$$Z = Z_0 + \frac{\sin^3 \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 + \sin^3 \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) [1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]^2} \cdot C_0 [t(\alpha) - t_0],$$

$$t(\alpha) = t(\alpha_1) + t(\alpha_2),$$

$$t_0 = C_0^{-1} \cdot D_0 [(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) / \sin(\alpha_1 + \alpha_2)],$$

$$Z_0 = D_0 [\sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 / \sin(\alpha_1 + \alpha_2)].$$

Соотношение (9) не только более удобно для различных бистатистических схем зондирования, но должно быть при равных погрешностях в исходных данных более точным, чем аналогичные соотношения в работах [4, 5], так как в нем глубина имеет поправку на рефракцию — $Z = Z_0 + \varepsilon \cdot Z(\alpha)$.

В статье [10], в отличие от работ [4, 5], не приведены результаты численных экспериментов по восстановлению искомого ВРСЗ, вероятно из-за отсутствия программы для расчетов на ЭВМ. Нами совместно с О. П. Калининченко была разработана такая программа, по своей структуре аналогичная программе GIDR. Численные эксперименты по решению обратной задачи восстановления искомого ВРСЗ способом, изложенным в работе [10], с использованием этой программы показали в основном такие же результаты, что и полученные ранее нами и авторами работ [4, 5] при выполнении численных экспериментов с прямоугольной схемой зондирования, что является следствием использования в программах процедур сглаживания сплайн-функциями. Преимуществом восстановления искомого ВРСЗ с использованием алгоритма (9) является отсутствие дополнительных методических погрешностей по времени прихода Δt_M . Однако методические погрешности по углу прихода $\Delta \alpha_{1,2M} \leq \pm \theta$ остаются.

Способ приближенного дифференцирования. Продифференцируем соотношение (1) по $\Gamma(\alpha)$, получим $C[\Gamma(\alpha)]^{-1} = t'[\Gamma(\alpha)]$ или $C[\Gamma(\alpha)] = t'[\Gamma(\alpha)]^{-1}$. Но $t'[\Gamma(\alpha)] \approx \Delta t(\alpha) / \Delta \Gamma(\alpha)$, где $\Delta t(\alpha)$ и $\Gamma(\alpha)$ — приращение времени и пути распространения акустического сигнала, тогда

$$C[\Gamma(\alpha)] \approx \Delta \Gamma(\alpha) / \Delta t(\alpha). \quad (10)$$

В работе [11] соотношение (10) используется для восстановления искомой скорости звука на горизонте $Z(\alpha_i)$ в дистанционной аппаратуре, у которой в вертикальной плоскости излучающей антенны образуются два веера по 15 лепестков ее ХН с углами наклона $\alpha_{i1,2}$. В каждой паре лепестков ХН акустические сигналы распространяются от источника I по двум лучам, выходящим под углами $\alpha_{1i} \approx \alpha_{2i}$, $\alpha_1 \approx \alpha_2$, $\alpha_{2i} > \alpha_{1i}$, а к приемнику 2 эти сигналы приходят по одному вертикальному лучу (рис. 5, а). Многочисленные мелкие акустические рассеиватели находятся в области пересечения характеристик направленности излучателя и приемной ХН.

На рис. 5, б представлены примеры восстановления искомого ВРСЗ, который обозначен сплошной кривой. Вертикальное распределение скорости звука, восстановленное по соотношению (11), обозначен пунктирной линией, а по соотношению (12) — крестиками. Использовались взятые из работы [11]

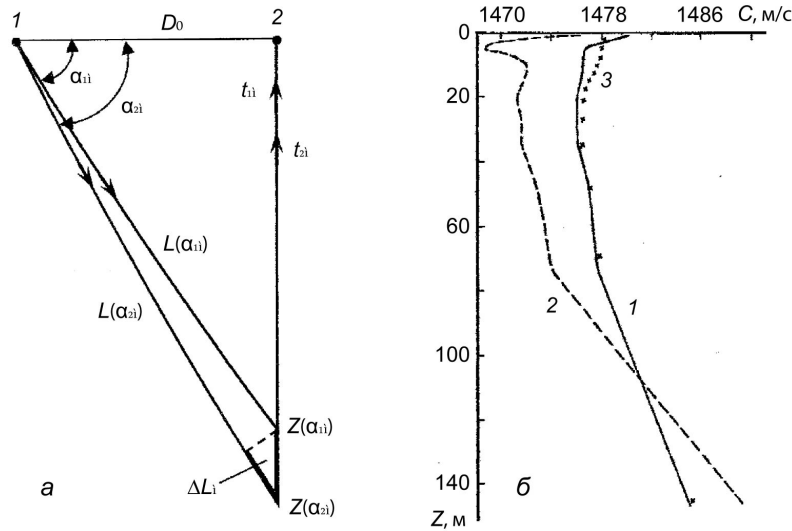


Рис. 5. К решению обратной задачи способом приближенного дифференцирования.

a — схема зондирования для пары лепестков ХН излучателя; *б* — результаты восстановления ВРСЗ.

1 — искомое вертикальное распределение скорости звука; 2 — вертикальное распределение скорости звука, восстановленное по соотношению (11); 3 — вертикальное распределение скорости звука, восстановленное по соотношению (12).

исходные данные без погрешностей и измеренное (искомое) ВРСЗ. Рис. 5 показывает более точное восстановление искомого ВРСЗ по соотношению (12) по сравнению с восстановлением его по (11).

Скорость звука на горизонте $Z(\alpha_{1i}) = D_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1i}$ определяется по формуле

$$C(\alpha_{1i}) = \Delta L_i / \Delta t_i, \quad (11)$$

где $\Delta t_i = \Delta t(\alpha) = \Delta t(\alpha_{2i}) - \Delta t(\alpha_{1i})$, $\Delta t(\alpha_{1i})$ и $\Delta t(\alpha_{2i})$ — время прихода акустического сигнала по пути $L(\alpha_{1i})$ и $L(\alpha_{2i})$ соответственно; $L(\alpha_{1i}) \approx D_0(1 + \sin \alpha_{1i}) / \cos \alpha_{1i}$ и $L(\alpha_{2i}) \approx D_0(1 + \sin \alpha_{2i}) / \cos \alpha_{2i}$; $L_i \approx L(\alpha_{2i}) - L(\alpha_{1i})$.

Существенным и принципиальным недостатком соотношения (11) для восстановления значений скорости звука на горизонте Z_i является наличие методической погрешности определения значений ΔL_i из-за неучета рефракции при распространении акустических сигналов. Нами найдено более точное решение обратной задачи восстановления искомого ВРСЗ способом приближенного дифференцирования для прямоугольной схемы зондирования морской среды.

В работе [3] показано, что для этой схемы зондирования уравнение (2) принимает вид

$$\int_0^{Z(\alpha)} \left\{ n[Z(\alpha)] + \sqrt{n^2[Z(\alpha)] - \cos^2 \alpha} \right\} dz = C_0 \cdot t(\alpha) - D_0 \cos \alpha.$$

После дифференцирования этого соотношения по α и несложных преобразований получим для схемы зондирования, представленной на рис. 5, следующий алгоритм восстановления скорости звука на горизонте Z_i :

$$C(Z_i) = 0.5[C(\alpha_{1i}) + C(\alpha_{2i})], \quad (12)$$

здесь $Z_i = 0.5[Z(\alpha_1) + Z(\alpha_2)] = 0.5D_0(\operatorname{tg} \alpha_{1i} + \operatorname{tg} \alpha_{2i})$;

$$C(\alpha_{i1,2}) = C_0 \left\{ 0.5 + \left[C_0 \cdot \Delta t_i \cdot \cos^2 \alpha_{i1,2} / (D_0 \cdot \Delta \alpha_i) + D_0 \cdot \Delta \alpha_i / (C_0 \cdot \Delta t_i) \right]^{-1} \right\}; \Delta \alpha_i = \alpha_{2i} - \alpha_{1i}.$$

Способ параллельных звуковых лучей. Способ параллельных звуковых лучей основан на определении разности времен прихода акустических сигналов с различных горизонтов по разнесенным в пространстве приемным лучам, имеющим «параллельные» наклонные траектории [12—14].

Геометрия зондирования водной среды в одной из возможной реализации разработанного способа [13, 14] восстановления ВРСЗ показана на рис. 6, *a*. Вертикально ориентированный остронаправленный излучатель из точки 1 излучает акустические импульсы, которые рассеиваясь на многочисленных мелких акустических рассеивателях в области пересечения ХН излучателя и приемных характеристик направленности, регистрируются приемной системой, размещенной на расстоянии D_0 от излучателя и состоящей из двух остронаправленных акустических приемников 2 и 3, расположенных на расстоянии d друг от друга на одном горизонте с излучателем.

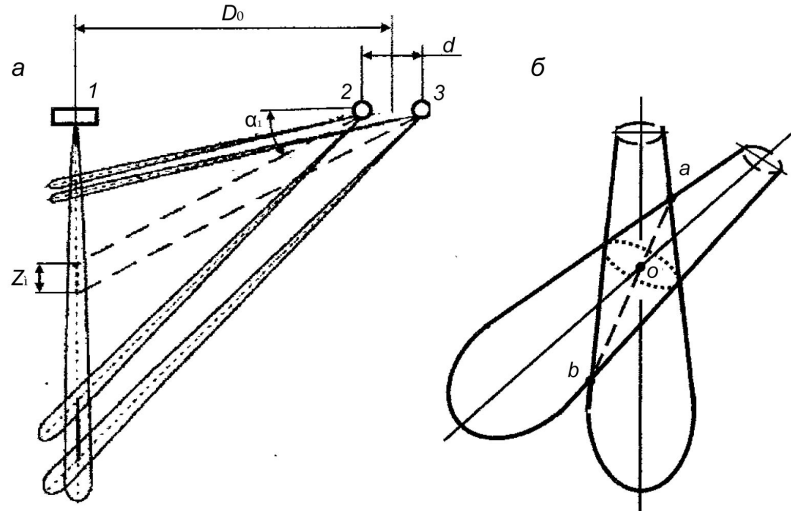


Рис. 6. К решению обратной задачи способом параллельных лучей.

a — схема зондирования, 1 — излучатель акустических сигналов, 2, 3 — приемники акустических сигналов;
b — рассеивающий объем, *a*, *b* — точки пересечения границ характеристик направленности излучателя и приемника акустических сигналов.

Приемники обеспечивают прием рассеянных сигналов с одного и того же направления, задаваемого углом α_i . Каждая пара приемных лучей с одинаковым углом приема следует за предыдущей с заданным шагом по углу от поверхности до предельной глубины зондирования.

ВСПЗ восстанавливается по известным расстояниям между излучателем и приемной системой D_0 , между приемниками d и измеренной зависимости разницы времен прихода рассеянных акустических импульсов по лучам приемных характеристик направленности в зависимости от угла приема $t_{ci} = t_{2i} - t_{1i}$ соответственно для второго и первого приемника.

Задержка t_{ci} принимаемого сигнала на втором приемнике относительно первого обусловлена прохождением сигналом некоторого расстояния в слое Z_i со средней скоростью C_{ci} . Были получены соотношения для их расчета.

$$t_{ci} = \frac{C_0 \cdot d}{C_{ci}^2 \cdot \cos \alpha_i} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - (C_{ci} \cdot \cos \alpha_i / C_0)^2} \right], \quad (13)$$

$$Z_i = t_{ci} \cdot C_i \frac{\sqrt{1 - (C_{ci} \cdot \cos \alpha_i / C_0)^2}}{1 + \sqrt{1 - (C_{ci} \cdot \cos \alpha_i / C_0)^2}}. \quad (14)$$

ВРСЗ в морской среде восстанавливается последовательно послойно посредством определения в них средних значений скоростей звука C_{cp} , по которым далее вычисляют значения скорости звука на границах слоев $C_{ci} = 2C_{cp} - C_{i-1}$. Для первого от поверхности слоя $C_{i-1} = C_0$.

Значения времен прихода t_{1i} и t_{2i} для определения t_{ci} находят по фронту τ_{ci} принятых акустических импульсов. Значения τ_{ci} являются случайными величинами в виду случайного характера количества и взаимного положения рассеивателей в области пересечения ХН излучателя и ХН приемников. Эта область для дискового излучателя и приемника представляет собой (рис. 6, б) два конуса с общим основанием, высотой h_1 — отрезок ao для первого конуса и высотой h_2 — отрезок с точками ob для второго конуса.

В работе [14] при рассмотрении составляющих погрешностей восстановления ВРСЗ было указано, что наибольшее влияние оказывает погрешность определения времени прихода акустических сигналов, однако конкретных исследований этого влияния не проводилось.

Из соотношения (13) можно получить выражение для оценки абсолютной погрешности ΔC_{ci} определения средней скорости звука C_{ci} в рассматриваемом слое

$$\Delta C_{ci} \approx \left\{ 2 \cdot t_{ci} / C - d \cdot \cos \alpha_i / \left[C_i \cdot C_0 \cdot \sqrt{1 - (C_i \cdot \cos \alpha_i / C_0)^2} \right] \right\}^{-1} \cdot \Delta t_{ci}. \quad (15)$$

Здесь $\Delta t_{ci} \approx 0.35\tau_{\phi i}$ — абсолютная случайная погрешность определения t_{ci} , в предположении, что ее определение производится по уровню половины длительности переднего фронта $0.5\tau_{\phi i}$ принятых акустических импульсов.

Если длительность излучаемого импульса τ такова, что $\tau C \ll z - z_p$, то длительность переднего фронта принятого акустического импульса равна

$$\tau_{\phi i} \approx (z - z_p)/C, \quad (16)$$

где $z_i = D_0 \operatorname{tg} \alpha_i$ — горизонт точки o ; $z_{1i} \approx x_{1i}/\sin \theta$, $x_{1i} \approx D_0 \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i - \theta)/[1 + \operatorname{tg} \theta \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i - \theta)]$ — координаты вершины (точки b) первого конуса; $\theta = \theta_{0.7}$ — половина углового раствора главного лепестка ХН акустического излучателя и приемника на уровне 0.707; C — скорость звука на горизонте рассеивающего объема.

Примем для значений исходных данных, как и в работе [14], $D_0 = 35$ м и $d = 1$ м, $2\theta_{0.7} \approx 0.5^\circ$, полагая, что акустические излучатель и приемники дисковые. Оценим по (13)—(16) при $C_0 \approx 1500$ м/с и $C_i \approx 1505$ м/с для ряда углов α_i и соответствующих для них горизонтов Z значения погрешностей ΔC_{ci} средней скорости звука в слое, а также значения времен задержек t_{ci} , толщин слоев Z_p и фронтов τ_{ci} принятых импульсов. Результаты оценок представлены в таблице.

Из таблицы следует, что при выбранных исходных данных получаем значения $\tau_{\phi i}$, соизмеримые со значениями определяемых разницу t_{ci} времен прихода к приемникам акустических импульсов. Это закономерно приводит к недопустимо высоким погрешностям ΔC_{ci} расчета средней скорости звука в слоях Z_i . Как показывает анализ, и при других практически реальных исходных данных имеют место аналогичные результаты расчетов. То есть предложенный в работах [12—14] для решения обратной задачи восстановления искомого ВРСЗ способ параллельных звуковых лучей является не пригодным для реализации.

Все предложенные способы решения обратных задач не учитывают влияния перемещения водной среды относительно источника и приемника акустических колебаний (эффекта Доплера), то есть предназначены для аппаратуры, определяющей ВРСЗ в дрейфе судна-носителя, что значительно снижает их практическую ценность. А при дистанционном зондировании в водной среде одиночных рассеивателей их количество ($N \geq 20$) на разных горизонтах в ХН излучателя по глубине, необходимое для решения обратной задачи, может быть «набрано» только на ходу судна.

Решение обратных задач при акустическом зондировании границ водной среды. Известные дистанционные акустические методы определения ВРСЗ в море основаны преимущественно на приеме сигналов из от мелких биологических организмов, находящихся в водном объеме, ограниченном характеристиками направленности источника и приемника акустических колебаний. В морской среде для некоторых сезонов года и времени суток концентрация биологических рассеивателей на нескольких горизонтах может быть недостаточной для функционирования аппаратуры на основе известных дистанционных акустических методах. Этих недостатков нет в дистанционных методах определения ВРСЗ в море, основанных на гидролокационном зондировании дна или поверхности водоема.

Способ для возвратно-наклонного зондирования. В работе [15] предложен дистанционный акустический способ определения ВРСЗ в море, названный автором возвратно-наклонного зондирования. Остронаправленная приемоизлучающая антенна размещается на горизонте Z_0 , на котором скорость звука равна C_0 . Излучается акустический импульс под малым углом α_i наклона ХН антенны. На глубине Z_p , где скорость звука станет равной $C(Z) = C_0/\cos \alpha_p$, распространяющийся акустический сигнал, в зависимости от вида ВРСЗ и знака угла наклона ХН антенны, рефрагирует или к поверхности моря,

Результаты оценок погрешностей способа параллельных лучей

α_i^0	Z , м	t_{ci} , мс	Z_p , м	τ_{ci} , мс	ΔC_{ci} , м/с
30	20.2	1.1	0.57	0.17	78
45	35	1.6	1	0.3	63
60	60.6	2.5	1.7	0.7	81
75	130.6	5	3.7	2.8	148
80	198.5	7.6	5.6	6.3	220

или ко дну и рассеивается. Часть обратно рассеянного сигнала возвращается к акустической антенне. Устанавливая различные углы α наклона ХН антенны, находят значения скорости звука $C(Z)$ на горизонтах $Z(\alpha)$ поворота звукового луча к поверхности моря или ко дну. Измеряют соответствующие этим углам времена прихода $t(\alpha)$ обратно рассеянного поверхностью или дном акустического сигнала. Значения горизонтов поворота определяются из решения относительно $Z(\alpha)$ нелинейного интегрального уравнения

$$t(\alpha) = \int_{Z_0}^{Z(\alpha)} \frac{dZ}{C(Z) \sqrt{1 - [\cos(Z) \cos \alpha / C_0]^2}}. \quad (17)$$

По оценкам автора метод позволяет определять скорость звука с погрешностью $\pm(1-5)$ м/с. Точность определения по (17) глубины не указана. При наличии экстремумов в изменении скорости звука по глубине определение горизонта поворота луча очень затруднено или невозможно. Не исследовано влияние хода судна. Из численных примеров, приведенных в работе [15], следует, что в глубоком море метод может быть осуществлен на звуковых частотах, так как расстояния от антенны до отражающих участков поверхности моря или дна значительны (сотни метров, километры). При этом для обеспечения требуемой ширины ХН несколько градусов, антенна должна иметь диаметр более двух метров. По указанным выше причинам реализация дистанционного акустического способа восстановления ВРСЗ для возвратно-наклонного зондирования границ практически невозможна.

Способ решения системы уравнений. В работе [16] предложен другой способ решения обратной задачи восстановления ВРСЗ при зондировании дна, который заключается в следующем.

Совмещенный с акустическим приемником источник звука ИП (рис. 7, а) располагают на фиксированном горизонте $Z_0 = 0$. Он последовательно излучает акустические колебания под углами наклона $\alpha_j \leq \pi/2, j = 1, 2, \dots, n, n+1$, одной ХН в одну и ту же рассеивающую область дна P на глубине места Z . При этом n равно количеству слоев с постоянными вертикальными градиентами скорости звука, на которые разбивается водная среда от горизонта Z_0 до горизонта Z . Обратно рассеянные от области дна P акустические сигналы распространяются к акустическому приемнику ИП, совмещенному с источником звука. На рис. 7, а символами $Z_i, i = 1, 2, \dots, n-1, n, Z_0 = 0, Z_n = Z$ обозначены горизонты нижних границ слоев. Измеряют времена распространения t_j акустического сигнала от источника-приемника звука ИП к рассеивающей области P и обратно до акустического приемника-источника звука ИП (времена прихода к приемнику акустических сигналов).

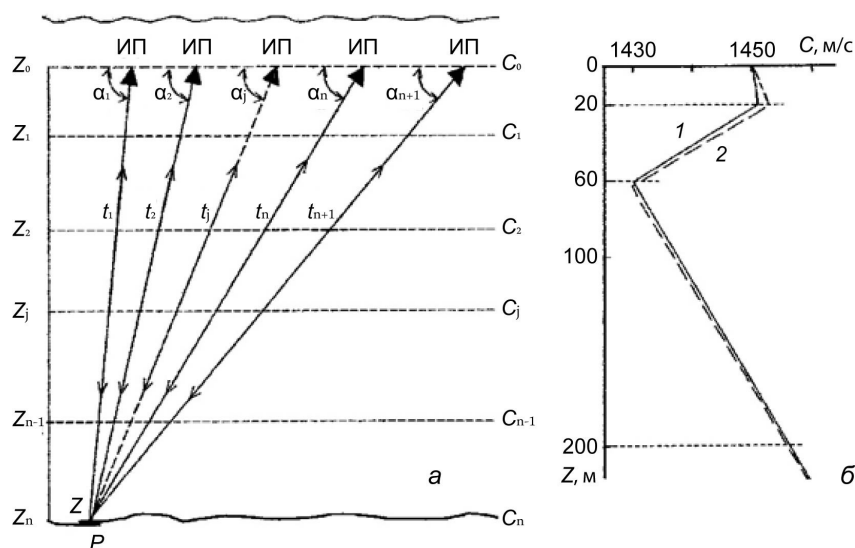


Рис. 7. К способу восстановления ВРСЗ решением системы уравнений.
 а — схема зондирования морского дна, ИП — источник-приемник звука; б — пример восстановления ВРСЗ:
 1 — известное вертикальное распределение скорости звука, 2 — восстановленное вертикальное распределение скорости звука.

Значения Z_i горизонтов нижних границ слоев определяются из соотношения $Z_i = \sum_1^i k_i \cdot Z$, в котором $k_i \cdot Z = Z_i - Z_{i-1}$ — толщина i -го водного слоя с постоянным вертикальным градиентом скорости звука, $k_i = (Z_i - Z_{i-1}) / Z$ — коэффициент, по которому определяют толщину слоя $k_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n k_i = 1$.

Значение Z и значения скорости звука C_p на нижних границах слоев при гидролокационном зондировании рассеивающей области дна по схеме рис. 7, а находятся решением системы из $n + 1$ уравнений

$$t_j - \sum_{j,i=1}^n \frac{k_i \cdot Z}{C_i - C_{i-1}} \cdot \ln \left(\frac{1 - \sin \alpha_{j,i}}{1 + \sin \alpha_{j,i}} \cdot \frac{1 + \sin \alpha_{j,i-1}}{1 - \sin \alpha_{j,i-1}} \right) = 0, j = 1, 2, \dots, n, n + 1,$$

где $\alpha_{j,i} = \arccos(C_i \cdot \cos \alpha_{j,0} / C_0)$ — угол выхода луча из i -го слоя при j -м угле зондирования; $\alpha_{j,0} = \alpha_j$ — угол входа луча в первый слой; угол наклона ХН антенны гидролокатора, угол зондирования.

Для решения системы уравнений необходимо знание количество слоев n водной среды и соответственно количество и значения коэффициентов k_i , начальные приблизительные значения глубины места Z и скорости звука C_i на нижних границах слоев, которые находят при использовании априорной информации — предварительных измерений ВРСЗ другим способом, например, аппаратурой с погружающимся зондом, или из материалов банка океанографических данных. Начальное приблизительное значение Z можно определить по судовому эхолоту. Априорная информация используется только один раз перед первым определением ВРСЗ рассматриваемым методом. Далее при последующих определениях ВРСЗ в данном районе моря количество слоев, коэффициентов k_i и их значения остаются неизменными, а в качестве начальных приблизительных значений Z и C_i используются их предыдущие значения.

Производилось компьютерным моделированием восстановление известного ВРСЗ в море. В качестве известного было выбрано измеренное и аппроксимированное по трем слоям ВРСЗ, характерное для мелкого моря летом. Использовалась априорная информация из банка океанографических данных — значения скорости звука $C_{ин} = 1450, 1451, 1430$ и 1460 м/с на горизонтах $Z_{ин} = 0, 20, 60$ и 220 м соответственно. Результаты компьютерного моделирования по восстановлению ВРСЗ представлены на рис. 7, б, на котором сплошной линией показан известный ВРСЗ, а пунктиром — восстановленное ВРСЗ.

С увеличением количества слоев n повышается число уравнений системы, усложняется и понижается точность ее решения. Было выявлено, что при наличии случайной погрешности Δt измерения времен прихода удовлетворительное восстановление ВРСЗ имеет место, когда: $n = 1$, $\Delta t \leq 10^{-4}$ с; $n = 2$, $\Delta t \leq 10^{-5}$ и $n = 3$, $\Delta t \leq 10^{-6}$ с. То есть реально могут восстанавливаться ВРСЗ при $n = 1$ и $n = 2$, что для практики явно недостаточно. У предлагаемого способа решения обратной задачи восстановления ВРСЗ также не исследовано влияние хода судна.

Таким образом, несмотря на свои преимущества с точки зрения энергетики, известные дистанционные способы определения скорости звука по глубине акустическим зондированием границ водной среды и соответствующие обратные задачи восстановления ВРСЗ в настоящее время из-за малых функциональных возможностей реализовывать не целесообразно.

Наиболее приемлемым для практического использования в дистанционной аппаратуре является восстановление ВРСЗ способом линеаризации при зондировании в водной среде одиночных рассеивателей звука с геометрическими размерами, превышающими длину волны излучаемого сигнала. Для дистанционной измерительной аппаратуры, основанной на зондировании в море многочисленных мелких акустических рассеивателей и функционирующей с судна, нашел применение на практике алгоритм восстановления ВРСЗ способом приближенного дифференцирования.

Литература

1. Бухгейм А. Л. Уравнения Вольтера и обратные задачи. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
2. Варлань А. Ф., Сизиков В. С. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1978. 292 с.

3. Бухгейм А. Л., Зенкова Н. П. О решении одного интегрального уравнения первого рода // Вопросы корректности задач математической физики. Новосибирск: Изд. ВЦ СО АН СССР, 1977. С. 23—31.
4. Бухгейм А. Л., Зенкова Н. П. О дистанционном определении скорости звука // Распространение акустических волн. Тезисы докладов второй дальневосточной акустической конференции. Человек и океан. Ч. I. Владивосток, 1978. С. 55—57.
5. Бухгейм А. Л., Зенкова Н. П. О дистанционном определении характеристик слоистых сред // Геология и геофизика. 1981. № 7. С. 81—88.
6. Лобанов В. И., Микушин И. И., Серавин Г. Н. О реализации импульсного дистанционного метода измерения ВРСЗ в море // Известия ТТИ ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9(146). С. 129—134.
7. De Witz G. H. Determination of ocean sound velocity profiles. Patent 3388372 USA. 11.06.68.
8. Серавин Г. Н. Устройство для измерения вертикального распределения скорости звука в жидких средах. А.С. 761845 СССР. 1980. Б.И. № 33.
9. Бравичев А. С. Устройство для измерения вертикального распределения скорости звука в жидких средах. А.С. 1675687 СССР. 1991. Б.И. № 33.
10. Остаев В. Е. О возможности восстановления вертикальных профилей скорости звука в бистатической схеме акустического зонирования атмосферы и океана // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 2. С. 199—203.
11. Brown E. H., Farmer D. M. The echometer-an acoustic ocean sound speed profiler — Int. Geosci. Sens. Symp. San Fransisco, Calif. 31 august-2 sept. 1983. Vol. 2. P.FA6 3/1 - FA6 3/6.
12. Борисов С. А., Раскина М. А. Численное восстановление профиля скорости звука методом лучевого параметра // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2006 — Море и человек». Таганрог, 2006. № 12 (67). С. 126—129.
13. Борисов С. А., Раскина М. А. Устройство для измерения вертикального распределения скорости звука в жидких средах: Пат. 2330248 РФ. 2008. БИ № 21.
14. Раскина М. А. Оценка погрешности восстановления профилей скорости звука при дистанционном экологическом мониторинге водных масс // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2009 — Море и человек». Таганрог, 2009. № 6. С. 91—95.
15. Остаев В. Е. О восстановлении вертикальных профилей скорости звука в океане по рефракции акустической волны // Акустический журнал. 1984. Т. 30, № 3. С. 352—357.
16. Микушин И. И., Серавин Г. Н. Дистанционный акустический метод определения ВРСЗ в море // Труды XII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2012)». СПб.: Наука, 2014. С. 241—244.