

УДК 551.463.621.391

В.И. Каевитсер, С.П. Тарасов, А.И. Захаров, И.В. Смольянинов, Г.В. Солдатов**ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА
В ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ
ГИДРОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ**

Рассмотрены возможности и предложены методики дистанционного зондирования донного грунта и водной толщи с целью определения их акустических свойств по фазовым измерениям эхосигналов при вертикальном акустическом зондировании узконаправленным излучением эхолотами и профилографами. Это позволит получить качественно новую информацию о неоднородностях воды и донного грунта и возможность более точной их классификации. Рассмотрен порядок получения распределения отраженного сигнала эхолота по запаздыванию. Определена разность фаз сигналов соседних отсчетов по различию во времени запаздывания сигналов. Выявлена связь разности фаз сигналов соседних отсчетов со скоростью звука в неоднородном слое. Рассмотрено применение описанного метода для получения еще одной классификационной характеристики - определение возможной дисперсии скорости звука в донных отложениях. Для реализации предлагаемого метода необходимо сформировать специальный двухчастотный сигнал. Для экспериментальной реализации когерентного двух частотного зондирования дна был применен алгоритм раздельной обработки эхо-сигналов из нижней и верхней половины спектра излучаемого ЛЧМ сигнала. Приведены экспериментальные результаты применения разработанных методик для дистанционного определения изменений скорости звука в воде и донных отложениях. Для исследования информативности фазовых характеристик эхосигналов профилографа при классификации донных отложений было проанализировано распределение по дальности приращения разности фаз сигналов отдельно для «низкочастотного» и «высокочастотного» диапазона. Получена информация о набеге по запаздыванию (производной) разности фаз между эхо-сигналами на акустических изображениях, полученных при использовании «высокочастотной» и «низкочастотной» составляющих зондирующего сигнала. Полученные результаты указывают на неслучайный характер измеряемых величин, они открывают возможность формирования с помощью статистической обработки новых устойчивых признаков для целей дистанционной классификации донных отложений. Экспериментальное применение фазовых методов для исследования вариаций скорости звука в приповерхностном слое воды позволило выявить качественное совпадение изменений скорости звука по предлагаемой методике с измерениями скорости звука с помощью специализированного погружного прибора, осуществляющего измерение контактным способом. Намечены направления дальнейших исследований для реализации разработанных методик в принципиально новых перспективных измерительных системах дистанционного зондирования водной среды и донных отложений.

Дистанционное акустическое зондирование; классификация зондируемых сред; эхолоты; профилографы; линейная частотная модуляция (ЛЧМ); цифровая обработка эхосигналов; фазовый анализ эхосигналов.

V.I. Kaevitser, S.P. Tarasov, A.I. Zakharov, I.V. Smolyaninov, G.V. Soldatov**POSSIBILITY OF DETERMINATION OF SOUND VELOCITY VARIATION
THE IN WATER-SATURATED SEDIMENTS BY VERTICAL SONAR SENSING**

The possibilities of remote sensing of bottom soil and water layer variations and direct measurements their acoustic properties in phase analysis of echo signals of sounders and profilers with highly directional radiation in vertical acoustic sounding scheme are discussed and respective techniques are proposed. It will allow to receive qualitatively new information on not uniformity of water and ground soil and possibility of their more exact classification. The order of receiving distribution of the reflected sonic depth finder signal on delay is considered. The difference of phases of signals of the next counting is determined by distinction in time of delay of sig-

nals. Communication of a difference of phases of signals of the next counting with sound speed in a non-uniform layer is revealed. It is considered application of the described method for obtaining one more classification characteristic - definition of possible dispersion of speed of a sound in ground deposits. For realization of the offered method it is necessary to create a special two-frequency signal. The algorithm of separate processing of echo signals from the lower and top half of a range of the radiated signal LChM was applied to experimental realization of coherent two frequency soundings of a bottom. Experimental results of application of the developed techniques for remote definition of changes of speed of a sound in water and ground deposits are given. For research of informational content of phase characteristics of echo signals of a profilograf at classification of ground deposits distribution on range of an increment of a difference of phases of signals separately for "low-frequency" and "high-frequency" range was analysed. Information on attack on delay (derivative) difference of phases between echo signals on the acoustic images received when using "high-frequency" and "low-frequency" components of the probing signal is received. The received results indicate nonrandom character of the measured sizes, they open possibility of formation by means of statistical processing of new steady signs for remote classification of ground deposits. Experimental for research of variations of speed of a sound in a near-surface sheet of water high-quality coincidence of changes of speed of a sound by the offered technique with measurements of speed of a sound by means of the specialized submersible device which is carrying out measurements in the contact way allowed to reveal applications of phase methods. The directions of further researches for realization of the developed techniques in essentially new perspective measuring systems of remote sensing of the water environment and ground deposits are planned.

Acoustic remote sensing; classification of probing media; echo sounders; sonar profilers; chirp modulation; digital echo signals processing; phase analysis of echo signals.

Введение. Дистанционное акустическое зондирование морского дна профилографами с целью экологического мониторинга широко используется для исследования состояния донных грунтов. Донные осадки накапливают в себе все, что содержится в водной среде. Тщательно изучая структуру дна водоема и состава донного грунта можно получить детальную информацию о состоянии водной среды и перспективах ее. Акустическое зондирование основано на распределении амплитуды отраженного сигнала в толще донного грунта и дает информацию о глубине дна, наличии водонасыщенных осадков и других неоднородностей [1–6]. Однако амплитуда эхосигнала характеризует изменение коэффициентов отражения от разных слоев осадков, но не обеспечивает прямых измерений таких акустических параметров зондируемой среды, как скорость звука в грунте, связанную с плотностью осадочного покрова. Существует методы бистатической локации с использованием нескольких приемников, разнесенных по пространству [7,8,9,10,11,12]. Они подразумевают помимо вертикального зондирования, излучение и прием под разными углами. Преимущество таких методов является то, что они позволяют получить значение скорости звука, а не только ее изменение в определенной области донных отложений. Однако, во многих случаях достаточно знать изменение скорости звука, чтобы определить структуру и параметры донных отложений. Перспективным средством для формирования низкочастотных узконаправленных широкополосных сигналов может служить параметрическая антенна [13–17]. В настоящее время в России изготовлено несколько низкочастотных параметрических антенн [18, 19], позволяющих проводить исследования слоистой структуры морских осадков толщиной более 100 м.

Постановка задачи. Задачей данного исследования является демонстрация возможности дистанционного обнаружения и прямых измерений вариаций акустических свойств донного грунта и водной толщи по фазовым измерениям эхосигналов при вертикальном акустическом зондировании узконаправленным излучением эхолотами и профилографами, что позволит получить качественно новую информацию о неоднородностях воды и донного грунта и возможность более точной их классификации.

Рассмотрим порядок получения распределения отраженного сигнала эхолота по запаздыванию. В описываемых экспериментах использовался зондирующий сигнал с ЛЧМ, который можно описать следующей формулой:

$$m(t) = A \exp\left(j\pi\left(2f_0t + \frac{f_{dev}}{T}t^2\right)\right), \quad (1)$$

где f_0 – несущая частота; T – длительность импульса; f_{dev} – девиация частоты; A – амплитуда сигнала. Детальное распределение эхо-сигнала по запаздыванию τ (строка изображения) получалось в ходе корреляционной обработки массива отсчетов принятого эхо-сигнала $s(t)$

$$S(\tau) = \int s(t + \tau) m^*(t) dt. \quad (2)$$

Отсчеты эхо-сигнала $S(\tau)$ это комплексные числа, амплитуда которых передает отражательные свойства фрагментов зондируемой среды, выделяемых в результате согласованной фильтрации эхо-сигналов. На рис. 1 показаны условно форма и расположение главных лепестков корреляционной функции для двух соседних отсчетов по запаздыванию. Главный лепесток для первого отсчета начинается в точке τ_{s1} и заканчивается в точке τ_{e1} . Для соседнего отсчета лепесток начинается в точке τ_{s2} и заканчивается в точке τ_{e2} . На рисунке ширина главного лепестка по нулям больше расстояния между соседними отсчетами по запаздыванию, отчего соседние лепестки перекрываются.

Выделенный главным лепестком слой отражающей среды состоит из множества элементарных отражателей – взвесей, небольших объектов, границ между слоями воды с различными физическими характеристиками. Суммарный сигнал, отраженный этим слоем характеризуется некоторой амплитудой, определяющей отражательные свойства среды, и, как правило, случайной начальной фазой. Однако практически показано, что при небольшом объеме элемента разрешения, приращение фазы эхосигналов в соседних отсчетах не является случайной величиной и может использоваться в алгоритме оценки изменения скорости звука в зависимости от вариаций свойств водонасыщенных сред [20].

Одним из объяснений этого эффекта может быть то, что вследствие перекрытия интервалов $(\tau_{s1}; \tau_{e1})$ и $(\tau_{s2}; \tau_{e2})$ сигнал слоя в интервале $(\tau_{s2}; \tau_{e1})$ будет присутствовать в отсчетах сигнала S_1 и S_2 , обеспечивая коррелированность этих отсчетов. Запишем сигнал S_1 как сумму сигналов S_{11} и S_{12} :

$$S_1 = S_{11} + S_{12} = \int_{\tau_{s1}}^{\tau_{s2}} s_1(\tau) d\tau + \int_{\tau_{s2}}^{\tau_{e1}} s_1(\tau) d\tau. \quad (3)$$

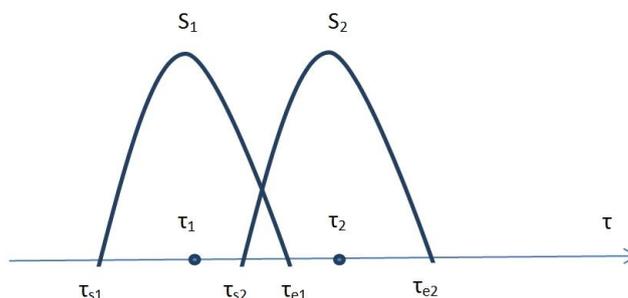


Рис. 1. Расположение главного лепестка корреляционной функции сигнала для соседних отсчетов распределения эхо-сигнала по задержке

Аналогично для второго отсчета:

$$S_2 = S_{21} + S_{22} = \int_{\tau_{s2}}^{\tau_{e1}} s_2(\tau) d\tau + \int_{\tau_{e1}}^{\tau_{e2}} s_2(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Перемножим первый отсчет на сопряженный второй и проведем усреднение по совокупности соседних строк изображения:

$$\begin{aligned} \langle S_1 S_2^* \rangle &= \langle (S_{11} + S_{12})(S_{21} + S_{22})^* \rangle = \\ &= \langle S_{11} S_{21}^* \rangle + \langle S_{11} S_{22}^* \rangle + \langle S_{12} S_{21}^* \rangle + \langle S_{12} S_{22}^* \rangle \end{aligned} \quad (5)$$

Вследствие некоррелированности сигналов неперекрывающихся слоев среды первое, второе и четвертое слагаемые в правой части равны нулю. Третье слагаемое – произведение сигналов одного и того же слоя среды, принятых в разное время в разных точках τ_1, τ_2 на оси запаздывания. Примем начальную фазу сигналов S_{12} и S_{21} , обусловленную суммированием большого количества элементарных отражателей в слое, одинаковой и равной нулю. Разность фаз сигналов соседних отсчетов определится различием во времени запаздывания сигналов S_1 и S_2 и, соответственно, в положении по дальности относительно общего слоя среды:

$$\Delta\varphi_{12} = \arg(\langle S_{12} S_{21}^* \rangle) = 2\pi f_c \Delta t - \frac{2\pi}{\lambda} V \Delta t + \varphi_{e1} - \varphi_{s2}, \quad (6)$$

где f_c – несущая частота, Δt – интервал времени между получением соседних отсчетов по запаздыванию, обратный частоте квантования сигнала f_{dis} , λ – длина волны в среде при скорости звука c , V – скорость звука в данном слое среды. Компоненты фазы φ_{e1} и φ_{s2} – неизвестные слагаемые фазы, обусловленные амплитудно-фазовыми характеристиками согласованного фильтра в месте расположения общего слоя для первого и второго отсчетов. Это неизвестная постоянная составляющая разности фаз соседних отсчетов. Выражение для разности фаз можно преобразовать так:

$$\Delta\varphi_{12} = 2\pi \frac{f_c}{f_{dis}} \left(1 - \frac{V}{c} \right) + \varphi_{e1} - \varphi_{s2}. \quad (7)$$

Согласно этому выражению, отличие скорости звука в среде относительно скорости c приводит к смещению разности фаз относительно некой неизвестной постоянной величины $\varphi_{e1} - \varphi_{s2}$, зависящей от фазовых характеристик главного лепестка корреляционной функции. Заметим, что это выражение практически совпадает с выражением, полученным в работе [20].

Пример применения данного метода для исследования осадочных слоев морского дна приведен в работе [20]. В ней использованы данные профилографа разработки ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН со следующими параметрами:

1. Зондирующий сигнал – импульсный с падающей ЛЧМ с изменением частоты в пределах 3655–7310 Гц.
2. Период повторения зондирующих импульсов 1.138 с.
3. Средняя длина акустической волны при скорости звука в воде 1500 м/с равна 30 см.
4. Частота квантования эхо-сигнала (действительные отсчеты) 14623.7 Гц.
5. Скорость движения носителя 3-5 м/с.
6. Отношение несущей частоты к частоте квантования комплексных отсчетов = 0.75.
7. Ширина диаграммы направленности антенны = 30°.

Пример изображения, получаемого такой профилографической системой, приведен на рис. 2. На этом рисунке носитель находится слева, строки изображения формируются последовательно сверху вниз. Сигналы с большим запаздыванием (большие глубины) находятся справа.

Данный фрагмент изображения состоит из 150 строк по 700 отсчетов в строке. При данных параметрах квантования сигнала расстояние между отсчетами сигнала в строке составляет 11 см. При указанной скорости движения судна расстояние между строками равно 4.5 м. Первый отклик от дна показан стрелкой 1 на рис. 2. Яркость и контрастность изображения прямо пропорциональна распределению мощности отраженного сигнала. На рис. 3 приведены данные изменения фазовых характеристик эхосигналов для этого же фрагмента в полутонах, из которого видно что результаты измерений имеют не случайный характер.

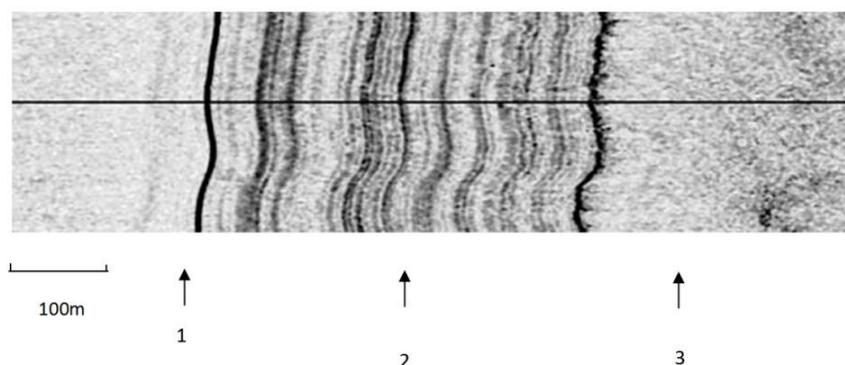


Рис. 2. Фрагмент амплитудного изображения, полученного профилографом

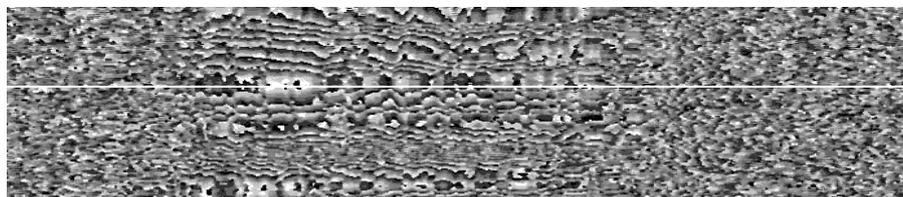


Рис. 3. Фрагмент фазовой картины, полученной профилографом

Использование информации о фазе в двухчастотном методе акустического зондирования. В качестве развития рассмотренной методики рассмотрим применение описанного метода для получения еще одной классификационной характеристики – определение возможной дисперсии скорости звука в донных отложениях. Возможность двухчастотного зондирования может быть реализована благодаря специализированной обработке эхо-сигналов профилографа, излучавшего сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнал), частота которого менялась в полосе f_{dev} от 7.5 до 3.75 кГц на интервале длительности импульса T . Для экспериментальной реализации когерентного двух частотного зондирования дна был применен алгоритм отдельной обработки эхо-сигналов из нижней половины 3.75–5.375 кГц и верхней половины спектра 5.375–7.5 кГц. Эталонный ЛЧМ сигнал перед сверткой умножался на соответствующие взвешивающие окна:

$$C_u(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad \text{и} \quad C_l(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ 1, & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases}$$

Средняя длина волны для первого варианта обработки равна 22 см, а для второго – 31 см. На рис. 4 приведено изображение профиля участка дна при использовании нижней половины спектра сигнала.

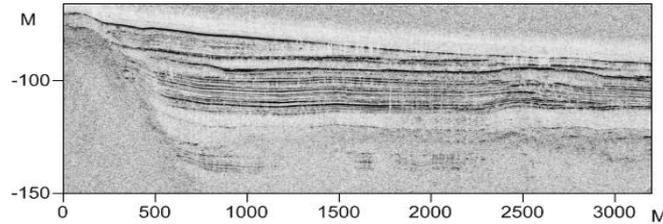


Рис. 4. Профиль участка дна на низкой частоте

На рис. 5 приведено изображение профиля участка дна при использовании верхней половины спектра зондирующего сигнала. Отличие в амплитудных изображениях слоев на изображениях, полученных на разных частотах, очевидно. На условно «низкочастотном» изображении первые слои не столь яркие, как на «высокочастотном». Кроме того, в первом случае видно большее количество слоев, в том числе и на больших глубинах, например, слой на глубине 140 м. Отличия этих изображений по степени глубины профилирования могут быть объяснены меньшим поглощением акустических волн в водной среде и грунте на низких частотах. По этой же причине изображение на рис. 4 менее зашумлено.

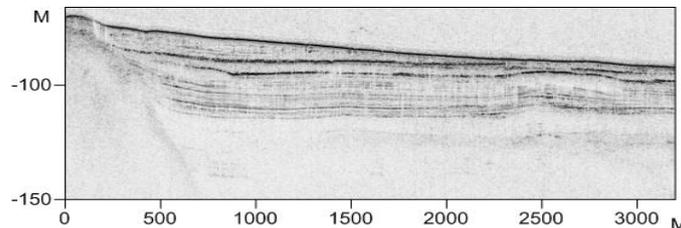


Рис. 5. Профиль участка дна на высокой частоте

Для исследования информативности фазовых характеристик экосигналов профилографа при классификации донных отложений было проанализировано распределение по дальности приращения разности фаз сигналов отдельно для «низкочастотного» и «высокочастотного» диапазона. Этот подход подобен двухчастотному радиопросвечиванию плазмы в радиофизических исследованиях космоса, дисперсионной интерферометрии, но реализован для гидролокационного случая, что позволяет расширить возможности зондирования сред прохождения сигнала и классификации исследуемых сред. Разностно-фазовую картину можно сформировать, вычтя поэлементно фазы отсчетов «низкочастотного» изображения $g_l(t)$ из фаз отсчетов «высокочастотного» изображения $g_u(t)$ и скомпенсировав фазовый набег по времени за счет отличия их центральных частот на величину $f_{dev}/4$:

$$\varphi(t) = \arg \left(g_u(t) g_l^*(t) \exp \left(\frac{-2\pi f_{dev} t}{4} \right) \right). \quad (8)$$

Более удобно эту разностно-фазовую картину представить в виде приращенной разности фаз по строке $\varphi'(t)$. На рис. 6 приведена информация о набеге по запаздыванию (производной) разности фаз между эхо-сигналами на акустических изображениях, полученных при использовании «высокочастотной» и «низкочастотной» составляющих зондирующего сигнала. Стрелкой здесь показана линия, соответствующая линии дна, которая хорошо видна на рис. 4 и 5. При равенстве скоростей сигналов из разных частей спектра разность фаз отсчетов двух изображений вдоль строки в формуле выше должна быть равна нулю. Наблюдаемые на рисунке вариации можно объяснить частотной зависимостью условий распространения зондирующего гидролокационного сигнала.

Полученные результаты указывают на неслучайный характер измеряемых величин, они открывают возможность формирования с помощью статистической обработки новых устойчивых признаков для целей дистанционной классификации донных отложений в дополнение к тем, которые были предложены в работе [1, 11, 12].

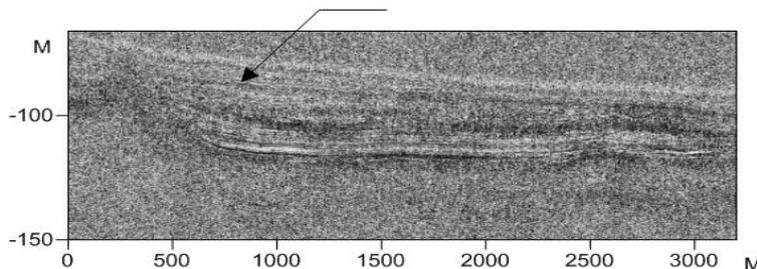


Рис. 6. Изображение для производной разности фаз сигналов по запаздыванию для изображений, построенных при использовании «высокочастотной» и «низкочастотной» составляющих зондирующего сигнала

Использование информации о фазе эхо сигнала эхолота для изучения водных сред. Рассмотренные методы относятся к исследованиям дна низко частотными профилографами, когда эффект донной реверберации выражен довольно сильно. Однако их также можно применить к высокочастотному зондированию водной среды. Во первых эффект реверберации водной среды на высоких частотах достаточно сильный, по крайней мере на глубинах первых ста метров. Во вторых состояние водной толщи достаточно стабильно, как по времени, так и по пространству. Этот факт позволяет проводить усреднение измеряемых величин по большому ансамблю и выявлять достаточно слабые эффекты.

Пример применения фазовых методов для исследования вариаций скорости звука в приповерхностном слое воды продемонстрируем с помощью данных эхолота со следующими параметрами:

1. Зондирующий сигнал – импульсный с ЛЧМ.
2. Центральная частота – 50 КГц.
3. Девиация частоты – 8 КГц.
4. Длительность импульса – 12.5 мс.
5. Частота квантования отсчетов – 16 КГц.

На рис. 7 приведены измеренные по описанной выше методике графики скорости звука по глубине и результаты измерения скорости звука с помощью специализированного погружного прибора, осуществляющего измерения контактным способом [21] (SVP).

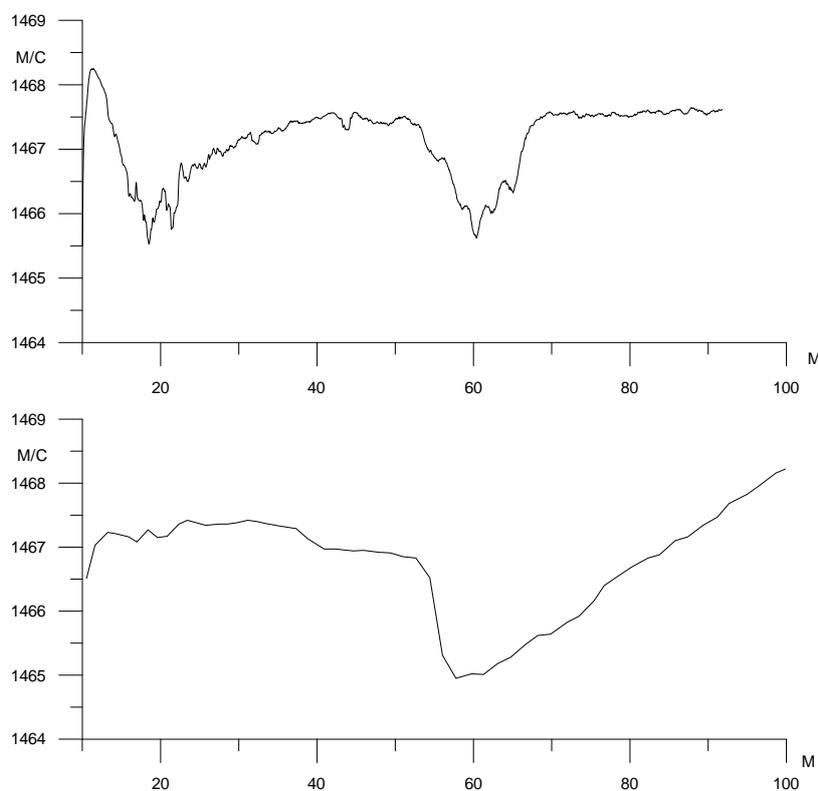


Рис. 7. Изменение скорости звука, в зависимости от глубины, по фазовым измерениям (вверху) и прямым измерениям с помощью погружного измерителя (внизу)

Выводы. Экспериментальные результаты показали качественное совпадение изменений скорости звука по глубине, полученных разными способами, что позволяет надеяться на возможность создать, на основе рассмотренной методики, принципиально новый дистанционный способ, получения профиля скорости звука водной среды.

В результате проведенных исследований показана перспективность дальнейших исследований по возможной дистанционной классификации донных отложений и водной толщи с помощью различных новых способов обработки ЛЧМ сигналов эхолота и профилографа и анализа информации о фазе сигнала. Перспективной рассматривается возможность применения при дальнейших исследованиях параметрических эхолотов с ЛЧМ зондирующими сигналами, поскольку в них реализуется высокая степень направленности акустического излучения, причем одновременно на высоких частотах накачки и низкочастотном диапазоне разностных частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куценко А.Н., Слуцкий Д.С. К вопросу о классификации донных осадков в целях экологического мониторинга прибрежных акваторий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6 (95). – С. 96-103.
2. Морская сейсморазведка / под ред. А.Н. Телегина. – М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 237 с.

3. *Боганик Г.Н., Гурвич И.И.* Сейсморазведка: учебник для вузов. – Тверь: Изд-во АИС, 2006. – 744 с.
4. Акустика морских осадков / под ред. Л. Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.
5. *Клей К., Медвин Г.* Акустическая океанография / под ред. Ю.Ю. Житковского. – М.: Мир, 1980. – 580 с.
6. Акустика дна океана / под ред. А. Купермана. – М.: Мир, 1984. – 454 с.
7. *Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Попов М.Г., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А.* Геофизические методы исследований. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.
8. *Орленок В.В.* Морская сейсмоакустика: Учеб. пособие. – Калининград, 1997. – 150 с.
9. *Gowski J.Te., Łubniewski Z.* Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acoustica // Acta Acoustica.* – 2002. – Vol. 88. – P. 623-626.
10. *Atallah L., P.J. Probert Smith.* Using Wavelet Analysis to Classify and Segment Sonar Signals Scattered from Underwater Sea Beds // *Acta Acoustica.* – 2002. – Vol. 88. – P. 615-619.
11. *Солдатов Г.В., Тарасов С.П., Пивнев П.П.* Методы определения акустических свойств и структуры морского дна с использованием параметрической антенны // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012. – С. 416-419.
12. *Солдатов Г.В.* Определение параметров донных осадков дистанционными методами в целях экологического мониторинга // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 9 (95). – С. 88-93.
13. *Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. – 448 с.
14. *Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
15. *Кузнецов В.П.* Нелинейная акустика в океанологии. – М.: Физматлит, 2010. – 264 с.
16. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Ленинград: Судостроение, 1981. – 264 с.
17. *Новиков Б.К., Тимошенко В.И.* Параметрические антенны в гидролокации. – Ленинград: Судостроение, 1990. – 235 с.
18. *Кириченко А.И., Пивнев П.П., Чаус Т.А.* Антенна накачки параметрического излучателя низкочастотного профилографа. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010-2012 / под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – 920 с.
19. *Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П.* Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // *Акустический журнал.* – 2009. – № 1. – С. 56-61.
20. *Гуляев Ю.В., Захаров А.И., Каевциер В.И.* Дистанционные измерения вариаций скорости звука в донных отложениях по данным акустического профилирования // Доклады Академии Наук. – 2007. – Т. 413, № 2. – С. 207-210.
21. *Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Методы и средства измерения скорости звука в море. – СПб.: Судостроение, 2012. – 224 с.

REFERENCES

1. *Kutsenko A.N., Slutskiy D.S.* К вопросу о классификации донных осадков в тельях экологического мониторинга прибрежных акваторий [The question of bottom sediments classification to ecological monitoring of shoaling water], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 6 (95), pp. 96-103.
2. *Morskaya seysmorazvedka* [Marine Seismic], Ed. by A.N. Telegina. Moscow: ООО «Geoinformmark», 2004, 237 p.
3. *Boganik G.N., Gurvich I.I.* Seysmorazvedka: Uchebnik dlya vuzov [Seismic: A Textbook for high schools]. Tver': Izd-vo AIS, 2006, 744 p.
4. *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics marine sediments], Ed. by L. Khemptona. Moscow: Mir, 1977, 533 p.
5. *Kley K., Medvin G.* Akusticheskaya okeanografiya [Acoustic oceanography], Ed. by Yu.Yu. Zhitkovskogo. Moscow: Mir, 1980, 580 p.
6. *Akustika dna okeana* [The acoustics of the ocean floor], Ed. by A. Kupermana. Moscow: Mir, 1984, 454 p.

7. *Khmelevskoy V.K., Gorbachev Yu.I., Kalinin A.V., Popov M.G., Seliverstov N.I., Shevvin V.A.* Geofizicheskie metody issledovaniy [Geophysical research methods]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Izd-vo KGPU, 2004, 232 p.
8. *Orlenok V.V.* Morskaya seysmoakustika: ucheb. Posobie [Marine Seismic Acoustics: tutorial]. Kaliningrad, 1997, 150 p.
9. *Gowski J.Te., Lubniewski Z.* Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acoustica, Acta Acoustica*, 2002, Vol. 88, pp. 623-626.
10. *Atallah L., P.J. Probert Smith.* Using Wavelet Analysis to Classify and Segment Sonar Signals Scattered from Underwater Sea Beds, *Acta Acoustica*, 2002, Vol. 88, pp. 615-619.
11. *Soldatov G.V., Tarasov S.P., Pivnev P.P.* Metody opredeleniya akusticheskikh svoystv i struktury morskogo dna s ispol'zovaniem parametricheskoy anteny [Methods for determination of acoustic properties and seabed structure using parametric array], *Trudy XI Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of the XI All-Russian Conference "Applied Technology hydroacoustic and hydrophysical"]. St. Petersburg: Nauka, 2012, pp. 416-419.
12. *Soldatov G.V.* Opredelenie parametrov donnykh osadkov distantsionnymi metodami v tselyakh ekologicheskogo monitoringa [Defining the parameters of sediments remote sensing for environmental monitoring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (95), pp. 88-93.
13. *Voronin V.A., Kuznetsov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I.* Nelineynye i parametricheskie protsessy v akustike okeana [Nonlinear and parametric processes in the ocean acoustics]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2007, 448 p.
14. *Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I.* Gidroakusticheskie parametricheskie sistemy [Sonar parametric system]. Rostov-on-Don: Rostizdat, 2004, 400 p.
15. *Kuznetsov V.P.* Nelineynaya akustika v okeanologii [Nonlinear acoustics in oceanography]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 264 p.
16. *Novikov B.K., Rudenko O.V., Timoshenko V.I.* Nelineynaya gidroakustika [Nonlinear sonar]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 264 p.
17. *Novikov B.K., Timoshenko V.I.* Parametricheskie anteny v gidrolokatsii [Parametric antenna sonar]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 235 p.
18. *Kirichenko A.I., Pivnev P.P., Chaus T.A.* Antenna nakachki parametricheskogo izluchatelya nizkochastotnogo profilografa. Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya. 2010-2012 [Antenna parametric radiator subwoofer profiler. Radar systems special and civil purposes. 2010-2012], Ed. by Yu.I. Belogo. Moscow: Radiotekhnika, 2011, 920 p.
19. *Esipov I.B., Popov O.E., Voronin V.A., Tarasov S.P.* Dispersiya signala parametricheskoy anteny v melkom more [Dispersiya parametric antenna signal in a shallow more], *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], 2009, No. 1, pp. 56-61.
20. *Gulyaev Yu.V., Zakharov A.I., Kaevitsker V.I.* Distantsionnye izmereniya variatsiy skorosti zvuka v donnykh otlozheniyakh po dannym akusticheskogo profilirovaniya [Remote measurement of variations of the sound velocity in the sediments according to the acoustic profiling], *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Akademii Nauk], 2007, Vol. 413, No. 2, pp. 207-210.
21. *Mikushin I.I., Seravin G.N.* Metody i sredstva izmereniya skorosti zvuka v more [Methods and means of measuring the speed of sound in the sea]. St. Petersburg: Sudostroenie, 2012, 224 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.А. Римский-Корсаков.

Кавицер Владилен Иосифович – ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН Россия; e-mail: kv43@mail.ru; 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. акад. Б.А. Введенского, 1; тел.: 84965652670; зам. директора; д.т.н.

Захаров Александр Иванович – e-mail: aizakhar@mail.ru; тел.: 84965652365; зав. лабораторией; д.ф.-м.н.

Смолянинов Илья Вячеславович – e-mail: ilia159@mail.ru; тел.: 84965652451; научный сотрудник.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp-47@mail.ru; 344006, г. Ростов-на-Дону, Б. Садовая, 105/42; тел.: 88634310635; зав. кафедрой; д.т.н.

Солдатов Геннадий Валерьевич – e-mail: g.soldatov@gmail.com; тел.: 88634681890; ассистент.

Kaevitser Vladilen Iosifovich – Kotel'nikov institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; e-mail: kvi43@mail.ru; 1, sq. acad. B.A. Vvedensky, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia; phone: +74965652670; deputy director; dr. of eng. sc.

Zakharov Alexandr Ivanovich – e-mail: aizakhar@mail.ru; phone: +74965652432; head of the laboratory; dr. of phis.-math. sc.

Smolyaninov Il'ya Vyacheslavovich – e-mail: ilia159@mail.ru; phone: +74965652451; research assistant.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; 105/42, Bolshaya Sadovaya street, Rostov-on-Don, 344006, Russia; phone: +78634310635; head of department; dr. of eng. sc.

Soldatov Gennady Valerievich – e-mail: g.soldatov@gmail.com; phone: +78634681890; assistant.

УДК 620.179.16

М.И. Сластен, В.И. Тимошенко

**О СЕРИИ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ИМПУЛЬСА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ С
ГАРМОНИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ
НАПРЯЖЕНИЯМИ**

В настоящее время акустические монокристаллы все более широко используются в различных областях современной радиоэлектроники, лазерной техники, оптико-акустических устройствах обработки информации и т.п. Обеспечение достаточной надежности устройств на основе монокристаллов требует разработки эффективных методов ультразвукового контроля их свойств при выращивании монокристаллов и изготовлении устройств на их основе. Технология выращивания монокристаллов постоянно совершенствуется, что также требует усовершенствования методов контроля их свойств. Ультразвуковой контроль качества монокристаллов разрабатывается непосредственно для каждого конкретного монокристалла с учетом типа его кристаллической решетки, упругих свойств и т.д. В данной работе рассматривается галлий-гадолиевый гранат, обладающий кубической решеткой, упруго изотропный, но оптически анизотропный. Основным дефектом, возникающим при выращивании монокристаллов галлий-гадолииевого граната, является наличие остаточных механических напряжений, отрицательно влияющих на работу, например, устройств обработки информации и т.п. Диагностика остаточных механических напряжений и их идентификация – выяснение характера напряженного состояния – осуществляются с использованием серии многократных отражений ультразвукового импульса, распространяющегося в плоскопараллельном образце монокристалла. Наиболее перспективная в настоящее время технология выращивания монокристаллов галлий-гадолииевого граната приводит к возникновению в выращиваемых монокристаллических слитках остаточных механических напряжений с распределением чередующихся сжатых и растянутых слоев, близким к гармоническому. Такое распределение сжатых и растянутых в большей или меньшей степени слоев приводит к серии многократно отраженных импульсов с особой нетрадиционной синусоидальной огибающей серии. Кроме этого, амплитуды эхоимпульсов в серии зависят, в основном, от неоднородности остаточных механических напряжений, а не их величины. Амплитуды эхоимпульсов в серии могут быть даже равны нулю при существенных по величине остаточных механических напряжениях.

Напряженное состояние; остаточные механические напряжения; гармоническое распределение остаточных механических напряжений; ультразвуковой контроль; акустическая диагностика; идентификация механических напряжений; многократные отражения; огибающая серии эхоимпульсов; акустические монокристаллы; монокристаллические слитки.