

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭХО-СИГНАЛОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВОДЫ СИГНАЛАМИ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

© 2017 г. В. И. Каевицер*, А. И. Захаров**, И. В. Смольянинов***

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского 1

*e-mail: kvi43@mail.ru

**e-mail: aizakhar@mail.ru

***e-mail: ilia159@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2015 г.

Исследованы фазовые характеристики эхо-сигналов при вертикальном акустическом зондировании водной среды узконаправленным излучением. Экспериментально показана возможность измерения зависимости фазы эхо-сигналов от запаздывания при зондирующем сигнале с линейной частотной модуляцией. Обоснована возможность дистанционного определения изменений скорости звука в воде.

Ключевые слова: дистанционное акустическое зондирование, классификация зондируемых сред, эхолоты, линейная частотная модуляция (ЛЧМ), цифровая обработка эхо-сигналов, фазовый анализ эхо-сигналов.

DOI: 10.7868/S0320791917010026

Проблема восстановления вертикального профиля скорости звука (ПСЗ) по данным дистанционного акустического зондирования водной среды давно привлекает внимание исследователей, поскольку применение для этих целей контактных измерителей производится при дрейфующем судне, что требует больших временных затрат и не позволяет определять пространственную изменчивость этого параметра. Теоретические исследования, проведенные в работах [1, 2], позволили получить уравнения, связывающие амплитуду эхо-сигналов с профилем скорости звука для горизонтально стратифицированной среды, однако практического использования данные результаты не нашли. В последние годы были предложены и промоделированы бистатистические методы измерения скорости звука в слое по задержке эхо-сигналов в горизонтально разнесенных приемниках. Так, в работе [3] используются сигналы от единичных рассеивателей с размерами, превышающими длину волны зондирующего сигнала. Однако отмечено, что в реальности точности измерений недостаточно для практического использования рассмотренного метода. В работе [4] использован метод параллельных лучей для слоистой среды, позволяющий по измеренной задержке и известному расстоянию между приемниками вычислить скорость звука в зондируемом слое. Проверка метода в гидроакустическом бассейне показала возмож-

ность дистанционного восстановления ПСЗ с точностью около 1 м/с. Необходимо отметить громоздкость конструкции бистатистических гидролокационных комплексов, что в реальных условиях приведет к усложнению вычислений и увеличению ошибки измерений.

Попытка измерения ПСЗ с помощью вертикального зондирования водной толщи эхолотом описана в работе [5]. Метод основан на связи скорости звука с гидрофизическими параметрами, в первую очередь температурой. Показана зависимость мощности эхо-сигналов эхолота по запаздыванию с температурой и давлением на соответствующем горизонте, что позволило экспериментально показать наличие корреляции контактных измерений и экспериментально оцененного ПСЗ. Отметим, что развития этот метод не получил в связи с рядом ограничений модели, использующей не прямые измерения скорости звука.

Следует отметить, что все рассмотренные методы основаны на измерениях амплитуды эхо-сигналов. Это снижает точность измерений и в большинстве случаев не позволяет различать участки с инверсией скорости звука.

Задачей данного исследования является демонстрация возможности дистанционного обнаружения и прямых измерений вариаций акустических свойств водной толщи по фазовым измерени-

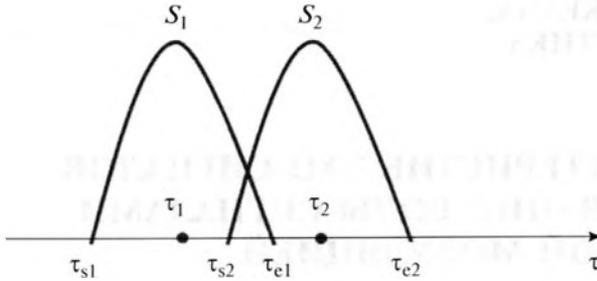


Рис. 1. Расположение главного лепестка корреляционной функции сигнала для соседних отсчетов распределения эхо-сигнала по задержке.

ям эхо-сигналов при вертикальном акустическом зондировании узконаправленным излучением, в частности в области скачка скорости звука, что имеет большое значение при решении задач морской акустики. В работе [6] было показано, что при определенных условиях сигнал, рассеянный от множества рассеивателей, может иметь когерентную составляющую. Это было подтверждено результатами экспериментов по зондированию водонасыщенных осадков эхолотами-профилографами [7].

Рассмотрим порядок получения распределения отраженного сигнала эхолота по запаздыванию. В описываемых экспериментах использовался зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), который описывается следующей формулой:

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

где f_c – несущая частота, T – длительность импульса, f_{dev} – девиация частоты, A – амплитуда сигнала. Детальное распределение амплитуды 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 непосредственно связана с рассеивающими свойствами фрагментов (импульсного объема) зондируемой среды, выделяемых в результате согласованной фильтрации эхо-сигналов. На рис. 1 показана форма и расположение главных лепестков корреляционной функции для двух соседних отсчетов распределения эхо-сигнала по задержке. Главный лепесток для первого отсчета начинается в точке τ_{s1} и заканчивается в точке τ_{e1} . Для соседнего отсчета главный лепесток начинается в точке τ_{s2} и заканчивается в точке τ_{e2} . На рисунке ширина главного лепестка по нулям больше расстояния между со-

седними 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 эхо-сигналов в соседних отсчетах не является случайной величиной и может использоваться в алгоритме оценки изменения скорости звука в зависимости от вариаций плотности водонасыщенных сред [7].

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} :

$$S_1 = S_{11} + S_{12} = \int_{\tau_{s1}}^{\tau_{e2}} s_1(\tau) d\tau + \int_{\tau_{s2}}^{\tau_{e1}} s_1(\tau) d\tau. \quad (3)$$

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:

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

где 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 с учетом двойного прохождения сигнала через слои преобразовать так:

$$\Delta\varphi_{12} = 4\pi \frac{f_c}{f_{dis}} \left(1 - \frac{V}{c}\right) + \varphi_{e1} - \varphi_{s2}. \quad (7)$$

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 [7].

Исследования в работе [7] проводились низкочастотными профилографами в условиях сильного эхо-сигнала, отраженного донными отложениями. Методы, использованные в этой работе, можно также применить при зондировании звукорассеивающих слоев (ЗРС) высокочастотными эхолотами с высоким энергетическим потенциалом. Отметим, что эффект отражения сигнала неоднородностями водной среды на высоких частотах достаточно сильный, по крайней мере на глубинах первых сотен метров. Кроме того, 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, полученных в натурном эксперименте с помощью 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;
6. Ширина диаграммы направленности антенны эхолота 10 градусов;
7. Импульсная излучаемая мощность 200 Вт.

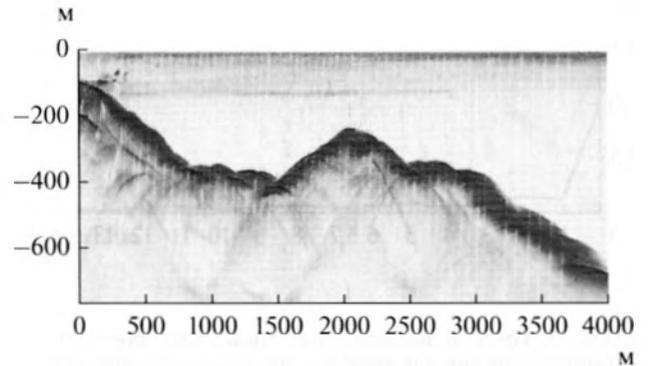


Рис. 2. Фрагмент полученного экспериментально распределения интенсивности эхо-сигналов по глубине. По горизонтали отложено пройденное расстояние, по вертикали глубина.

Измерения проводились в акватории Черного моря в марте 2010 г. Эхолот был установлен на судне, которое двигалось со скоростью 5 узлов. Фрагмент полученного экспериментально распределения интенсивности эхо-сигналов по глубине приведен на рис. 2. Строки отраженного сигнала по задержке (глубине) ориентированы вертикально. По горизонтали отложено пройденное расстояние. Интенсивность эхо-сигналов отображена яркостью. Кроме изменяющегося рельефа дна в диапазоне 100–600 м, в верхней части изображения видны звукорассеивающие слои с достаточно высокой отражающей способностью на глубинах до 130 м. Подчеркнем, что вследствие хорошей угловой избирательности антенны, направленной строго вниз, можно говорить о распределении эхо-сигналов по глубине, а не только по запаздыванию.

Факт коррелированности сигналов соседних пикселей по запаздыванию может быть подтвержден с помощью автокорреляционной функции выборки эхо-сигнала по запаздыванию:

$$P(i\Delta\tau) = \int s(t + i\Delta\tau)s^*(t)dt, \quad (8)$$

где $\Delta\tau$ – расстояние по запаздыванию между соседними отсчетами сигнала, i – номер отсчета корреляционной функции сигнала.

Пример экспериментальной автокорреляционной функции для выборок сигнала по дальности в звукорассеивающем слое приведен на рис. 3. Максимум автокорреляционной функции достигается при нулевом сдвиге. Видно, что несколько первых отсчетов корреляционной функции отличаются от нуля, что означает коррелированность не только соседних отсчетов эхо-сигнала, но и более разнесенных отсчетов по запаздыванию.

На рис. 4 приведены вычисленные по данным эксперимента фазовые набеги для пар соседних отсчетов эхо-сигнала и для пар отсчетов сигнала, от-

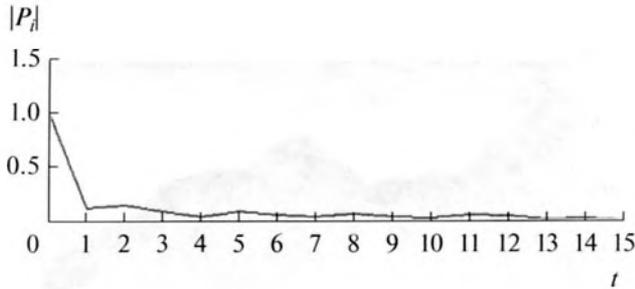


Рис. 3. Пример экспериментальной автокорреляционной функции для выборок сигнала по дальности в звукорассеивающем слое. По горизонтали отложен номер отсчета, по вертикали мощность.

стоящих на два интервала квантования, с усреднением по 400 строк эхо-сигнала; далее результирующая строка отсчетов сглаживалась скользящим окном длиной в 21 элемент. Среднеквадратическая ошибка оценки приращения фазы составляет около 1%.

Сравнение подтверждает удвоение вариаций фазовых приращений в области высокой интенсивности эхо-сигналов при использовании отсчетов, отстоящих на два интервала квантования, что означает удвоение фазового набега на вдвое большем интервале по запаздыванию. При увеличении интервала на четыре и более отсчетов корреляция пропадает и описываемый эффект исчезает, что говорит о недостаточно высоком для таких измерений энергетическом потенциале эхолота. Эффект также снижается (исчезает) при низких уровнях эхо-сигнала в данном сеансе измерений, с данным уровнем усреднения строк эхо-сигнала, однако этот факт нельзя считать принципиальным для предлагаемого метода обработки.

На рис. 5 приведены пересчитанный на основе измерения фазовых набегов график изменения скорости звука по глубине при $c = 1468$ м/с, а также результаты измерения скорости звука с помощью специализированного погружного прибора (SVP), использующего для измерения скорости звука прямой контактный метод [8].

Отметим качественное совпадение изменений скорости звука по глубине, полученных по описанной методике и прямым способом, а также возможность вычисления вариаций скорости звука со знаком. Это позволяет надеяться на возможность создания на основе рассмотренной методики принципиально нового дистанционного способа измерения вертикального профиля скорости звука в водной среде, по крайней мере в важной для практических задач области скачка. Учитывая мешающие факторы, такие как довольно широкая диаграмма направленности антенны эхолота и отсутствие калибровки тракта приема и обработки информации, можно ожидать, что при пересчете могут возникнуть неучтенные факто-

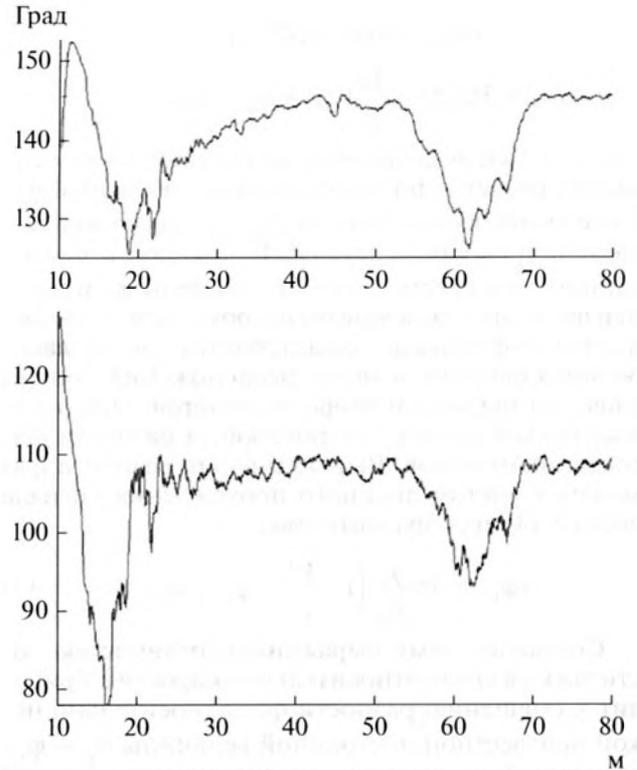


Рис. 4. Разности фаз эхо-сигналов, измеренные между соседними отсчетами (вверху) и между отсчетами, разнесенными на два интервала квантования (внизу).

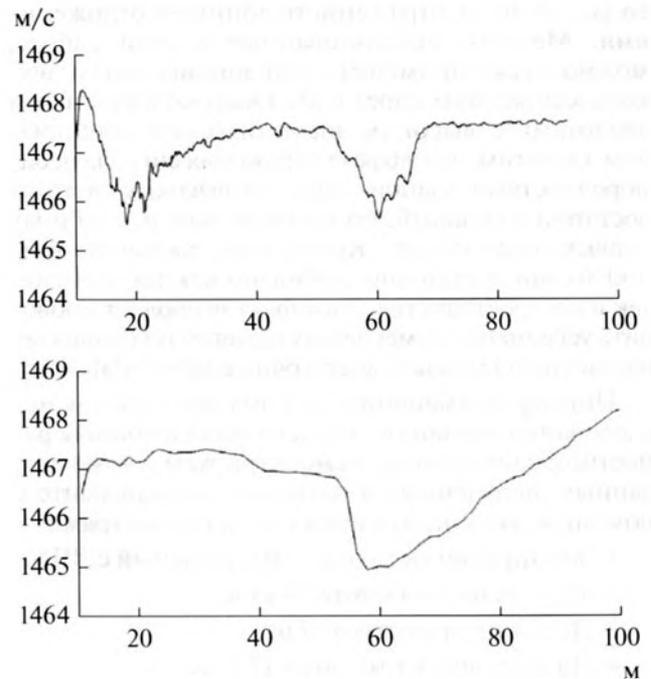


Рис. 5. Изменение скорости звука в зависимости от глубины по фазовым измерениям (вверху) и прямым измерениям с помощью погружного прибора (внизу).

ры, влияющие на количественные результаты, получаемые по формуле (7). Возможный дополнительный коэффициент пересчета может быть уточнен в процессе калибровки измерительной системы с привлечением данных измерителя (SVP). Некоторые различия в измеренном и вычисленном профилях скорости звука можно объяснить еще и тем, что сеансы измерений SVP и эхолота проводились не одновременно. Результаты проведенных исследований позволяют определить требования для постановки специального эксперимента по дистанционному акустическому зондированию, который может подтвердить возможность получения не только качественных оценок ПСЗ, но и разработать методику достаточно точных вычислений.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-0700398.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронович А.Г., Мальцев Н.Е.* Об определении акустической неоднородности среды при помощи звуковых сигналов // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 6. С. 860–867.
2. *Филинов В.Н., Черный Г.П.* К возможности определения скорости гидролокационным способом // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 4. С. 761–765.
3. *Лобанов В.Н., Микушин И.И., Серавин Г.Н.* О реализации импульсного дистанционного метода измерения ВРСЗ в море // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 9. С. 129–134.
4. *Раскита М.А., Борисов А.С., Борисов С.А.* Устройство для восстановления вертикальных профилей скорости звука при дистанционном зондировании морской среды // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2007. № 9. С. 99–108.
5. *Буренков С.В., Дудко Ю.В.* Об одном способе восстановления профиля скорости звука при акустическом зондировании океана // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 5. С. 886–891.
6. *Курьянов Б.Ф.* О когерентном и некогерентном рассеянии волн на совокупности точечных рассеивателей, случайно расположенных в пространстве // Акуст. журн. 1964. Т. 10. № 4. С. 195–201.
7. *Гуляев Ю.В., Захаров А.И., Каевицер В.И.* Дистанционные измерения вариаций скорости звука в донных отложениях по данным акустического профилирования // ДАН. Т. 413. № 2. 2007. С. 257–260.
8. *Микушин И.И., Серавин Г.Н.* Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб: Судостроение, 2012. 224 с.