

Определения скорости звука в донных отложениях при экологическом мониторинге

Г.В. Солдатов¹, С.П. Тарасов¹, В.И. Каевицер², А.И. Захаров²,

И.В. Смольянинов²

¹*Южный федеральный университет*

²*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН*

Аннотация: Основная часть загрязняющих веществ накапливается в морских осадках. Отсюда вытекает важность проблемы непрерывного мониторинга состояния дна и донных осадочных структур внутренних водоемов и морей. В работе рассмотрен метод дистанционного зондирования донного грунта с целью определения скорости звука в донном грунте. Предлагаемый метод позволяет проводить измерения при совместном расположении излучателя и приемника. В основе предлагаемого метода лежит метод лучевого параметра. Для проведения измерений по методу лучевого параметра необходимо либо обладать протяженной приемной антенной системой, способной определить направление прихода отраженных от дна акустических сигналов при простом всенаправленном излучателе, либо излучать узконаправленным источником звука и принимать относительно простой протяженной приемной антенной. С помощью параметрической антенны можно сформировать акустический луч шириной несколько градусов. Такой ширины луча достаточно для реализации метода лучевого параметра. Авторами предложено приближение метода лучевого параметра, позволяющее совместить местоположение излучателя и приемника, тем самым значительно упростив приемную антенну. Для проверки адекватности метода было проведено моделирование и проведены экспериментальные исследования. При моделировании закладывались реальные параметры морских донных слоистой структуры и приемоизлучающих систем. В результате моделирования были определены границы применимости предложенного метода при исследовании морских грунтов. Для определения скорости звука в слое морских осадков с приемлемой погрешностью нужно излучать акустические сигналы под углом не более 10 градусов. Экспериментальные исследования в акустическом бассейне показали качественное совпадение полученных данных с теоретическими.

Ключевые слова: дистанционное акустическое зондирование, классификация морских осадков, параметрический профилограф.

На экологическое состояние водной среды, морей и внутренних водоемов большое влияние оказывает состояние донных осадков. Основная часть загрязняющих веществ накапливается в морских осадках. Отсюда вытекает важность проблемы непрерывного мониторинга дна и донных осадочных структур внутренних водоемов и морей с целью повышения экологической безопасности, предупреждения стихийных бедствий, определения глобальных закономерностей осадконакопления и экологического загрязнения. В настоящее время исследование характеристик

донных слоев, а именно скорости звука и толщины, ведется акустическими системами, состоящими из всенаправленного излучателя и протяженной приемной антенны [1]. В ряде случаев применение протяженной приемной антенны не целесообразно. Например, при размещении акустической системы на автономном подводном аппарате, ввиду невозможности обеспечения контроля местоположения протяженной приемной антенны простым и надежным способом. Перспективным средством для исследования морского дна может служить параметрическая антенна [2-4]. Уникальные характеристики параметрических антенн, такие как малые размеры, высокая направленность и широкая полоса, позволяют по-новому взглянуть на используемые в настоящее время методы исследования донного грунта.

Задача данного исследования заключается в поиске новых методов определения параметров донного грунта и оптимизации приемоизлучающей акустической системы. В [5] показана эффективность метода лучевого параметра. Однако, этот метод не получил широкого распространения из-за трудоемкости вычислений и неоднозначностей, возникающих из-за ненаправленного излучателя. Применение параметрической антенны позволяет существенно упростить процесс определения акустических характеристик исследуемого слоя. Сложность в реализации метода заключается в необходимости принимать отраженные сигналы протяженной антенной.

Упростить приемную антенную систему можно путем, введения приближения в метод лучевого параметра. При этом для определения скорости звука в слое достаточно одного приемника, совмещенного с излучателем. Это открывает новые возможности для проведения исследовательских работ, где буксировка протяженной приемной антенны не возможна, например, с борта подводного аппарата.

Метод основан на регистрации рассеянных от границ донного грунта в обратном направлении сигналов, при различных углах падения. В качестве

излучателя необходимо использовать узконаправленную параметрическую антенну по ряду причин. Во-первых, с помощью параметрической антенны можно осуществить сканирование акустическим лучом шириной всего $1\div 3^\circ$ при небольших размерах антенны. Во-вторых, отсутствие боковых лепестков позволяет полностью исключить боковое поле, а значит траектории принятых сигналов однозначно определяются лучевым параметром p . Амплитуда рассеянных в обратном направлении сигналов убывает с ростом угла падения, поэтому достаточно уровня бокового поля всего несколько процентов, чтобы в приеме появились ложные сигналы, не принадлежащие лучу с параметром p .

В основе предлагаемого метода лежит метод лучевого параметра описанный в [5] для модели, состоящей из двух однородных плоскопараллельных слоев, лежащих на подстилающей границе. Пусть толщина первого слоя h_1 , скорость звука в нем c_1 . Толщиной второго слоя h_2 , скорость звука в нем c_2 . Направим акустический луч в сторону дна под углом θ к нормали к поверхности воды (рисунок 1).

Приемники акустических сигналов расположим в точках прихода на поверхность сигналов, отраженных от верхней и нижней границы слоя донного грунта. Скорость звука в слое донных осадков можно определить по формуле [5]

$$c_2 = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t}}, \quad (1)$$

где $p = \sin(\theta)/c_1$ – лучевой параметр; Δt – разность времен прихода лучей с одинаковым лучевым параметром p в точки x_2-x_1 ; $\Delta x = x_2-x_1$.

Очевидно, что время прихода рассеянных в обратном направлении от границ исследуемого слоя сигналов в точку излучения будет совпадать со временем прихода сигналов в точки x_1 и x_2 . Если установить приемную антенну в точке излучения, можно определить разность времен прихода лучей Δt из (1). Лучевой параметр p из (1) можно определить, зная, угол

излучения и скорость звука воды вблизи излучателя. Но определить Δx без разнесения точек излучения и приема не представляется возможным.

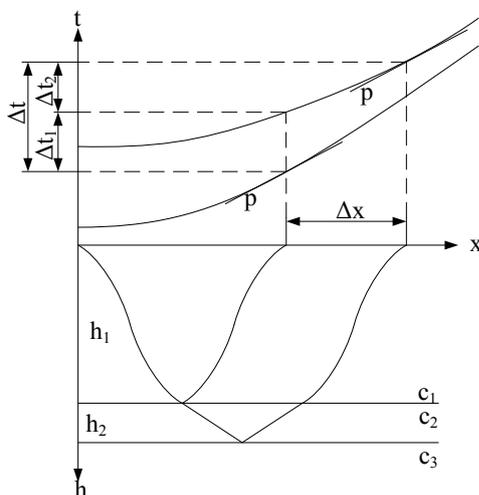


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация метода

Величину Δx можно не вычислять, если использовать специальное приближение для случая тонкого слоя. В [5] показано, что в случае достаточно большого различия в толщине слоев гидрографы на рисунке 8 практически являются прямыми, параллельными друг другу вдоль всего интервала Δx . При малых углах наклона акустической оси антенны к нормали к поверхности гидрографы также параллельны друг другу, что позволяет привести выражение (1) к следующему виду

$$p^2 = \frac{1}{c_2^2} - \frac{\Delta t_1^2}{4 \cdot h_2^2}, \quad (2)$$

где Δt_1 — временной интервал между двумя гидрографами отраженных волн при фиксированном значении x .

Аппроксимируя зависимость $p^2(\Delta t_1^2)$ прямой линией, становится возможным определение скорости звука в слое по отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат, и толщины слоя – по наклону прямой.

В уравнение (2) входит величина Δt_1 , разность времен прихода сигналов от границ исследуемого слоя в точку x_1 , определить которую предложенным методом нет возможности. Из рисунка 9а видно, что при

малых углах падения величина Δt_2 значительно меньше Δt_1 , то есть можно положить значение Δt_1 примерно равным Δt . Исключим величину Δt_1 из формулы (2), заменив ее на Δt . Тогда, выражение с помощью которого определяются параметры слоев предложенным методом примет вид

$$p^2 = \frac{1}{c_2^2} - \frac{\Delta t^2}{4 \cdot h_2^2}. \quad (3)$$

В связи с допущенным упрощением, при определении параметров исследуемого слоя возникнет методическая погрешность.

Оценим погрешность метода определения параметров слоя, обусловленную описанным выше приближением, от угла падения акустического луча на исследуемый слой. Для этого построим модель определения скорости звука предложенным методом. В модели сначала решается прямая задача с помощью приближений лучевой акустики. Определяется зависимость времен прихода сигналов от границ слоя при заданных расстоянии от антенны до дна равном 0,6 м, толщине исследуемого слоя – 0,1 м, скоростях звука в воде и исследуемом слое равным 1500 м/с и 2680 м/с. На рисунке 2 представлены траектории распространения лучей для угла наклона 10° и годографы, зависимости времени прихода сигналов от расстояния источник приемник (рисунок 2а), для углов наклона $0 \div 17^\circ$. Кривые 1 построены для лучей отраженных от верхней границы слоя, а кривые 2 – от нижней. Пунктирные линии на рисунке 2а отсекают на соответствующих осях Δx и Δt , которые входят в выражение (1).

Построим зависимость $p^2(\Delta t_1^2)$, кривые 1, и $p^2(\Delta t^2)$, кривые 2, для углов падения $0 \div 10^\circ$ (рисунок 3а) и $0 \div 15^\circ$ (рисунок 3б). Точками на кривой 2 нанесены данные соответствующие углам падения $0, 1, 2, \dots, 10^\circ$ и $0, 1, 2, \dots, 15^\circ$.

Анализируя кривые на рисунке 3 можно сделать вывод, что с увеличением угла падения увеличивается расхождение кривых 1 и 2.

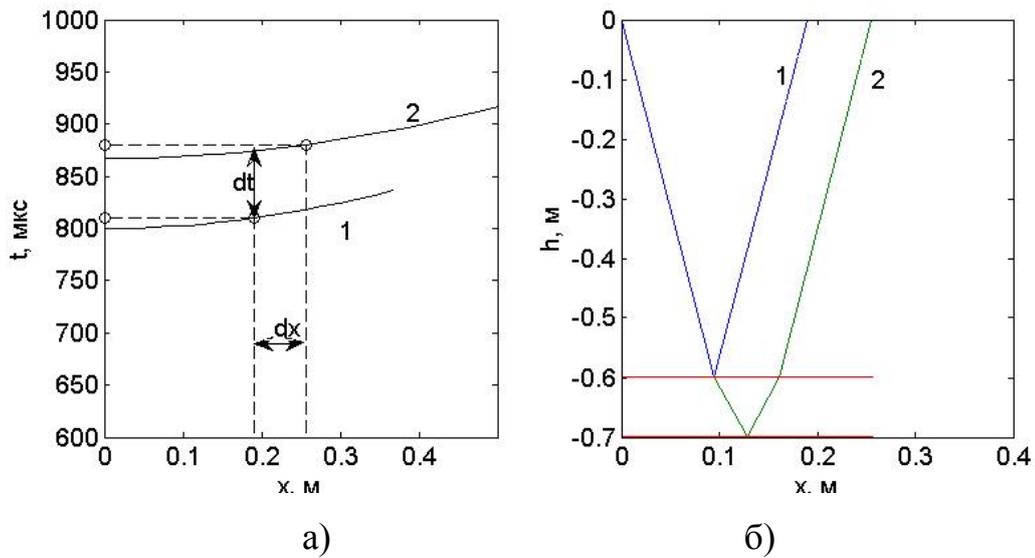


Рис. 2. Результаты моделирования распространения акустических лучей

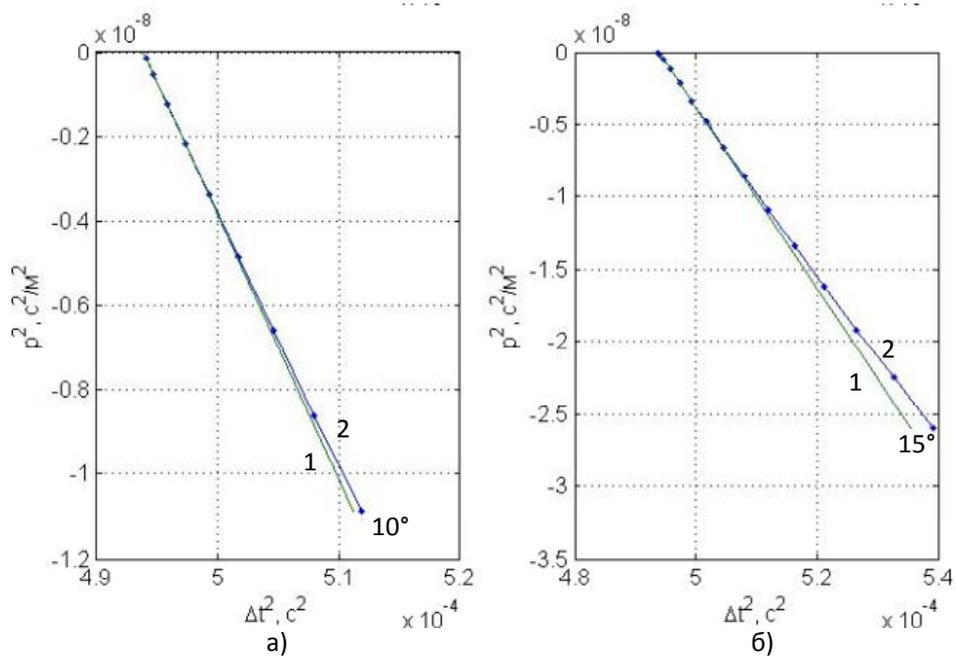


Рис. 3. Сравнение кривых Оценка погрешности метода

Однако, до углов падения 10° кривые 1 и 2 расходятся незначительно. Из вышесказанного можно сделать вывод, что определить параметры слоя предлагаемым методом с приемлемой точностью можно при углах падения не более 10° .

Приведенные выше параметры модели соответствуют параметрам экспериментальной установки структурная схема, которой приведена на рисунке 4. Экспериментальные исследования проводились в

гидроакустическом заглушенном бассейне 12 размером $1 \times 1,5 \times 1,5$ м. В качестве исследуемого слоя был выбран лист плексигласа 10 размером $50 \times 50 \times 10$ см. Максимально возможное отклонение акустической оси антенны в данной установке – 17° .

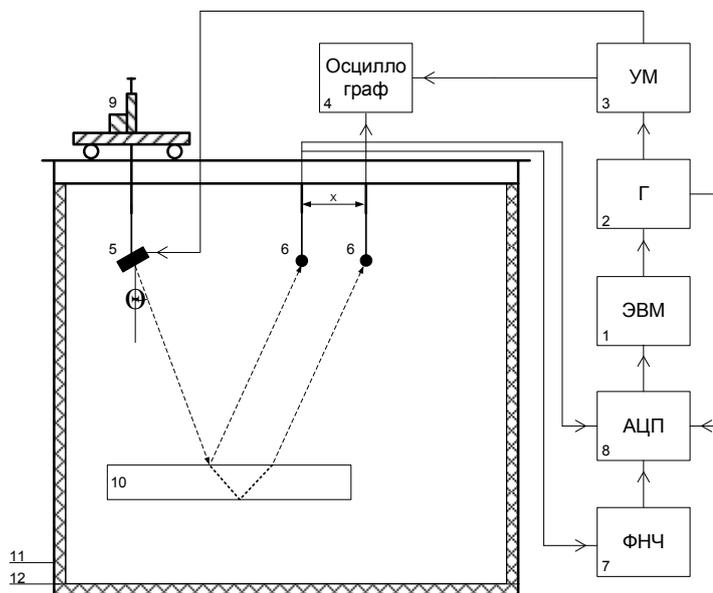


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

Работой установки управляет ЭВМ. В ЭВМ синтезируется сигнал с заданными параметрами. В экспериментах использовались следующие типы сигналов: тональный сигнал частотой 600 кГц длительностью 10 периодов, сигнал в виде биений двух частот 550 кГц и 650 кГц длительностью 30 мкс. Полученный сигнал загружается в 2 – ЦАП генератора сигналов специальной формы. Генератор формирует сигналы с заданными параметрами, которые подаются на вход 3 – усилителя мощности (УМ) и далее на 5 – излучатель. Контроль формы и основных параметров сигналов, подаваемых на излучающую антенну, осуществлялся 4 – осциллографом. В результате нелинейного взаимодействия в 10 – воде образуются вторичные волны, в том числе и волны разностной частоты. Отразившиеся от 11– объекта исследования (плексиглас) акустические сигналы поступают на 6 – приёмник. С приемника сигналы поступают на осциллограф, 7 – фильтр НЧ и на первый канал 8 – АЦП. С помощью осциллографа осуществляется



контроль формы и основных параметров принимаемых сигналов. Первый канал АЦП осуществляет запись сигналов накачки. Второй канал АЦП осуществляет запись сигналов разностной частоты с выхода фильтра НЧ. С генератора на АЦП поступает синхроимпульс, запускающий сбор данных. Далее принятые сигналы в цифровом виде передаются на ЭВМ для записи и визуализации. 9 – координатно-поворотная установка, 11 – звукопоглощающая резина.

Акустическая ось излучателя была направлена под углом 17° к нормали к поверхности воды. Чтобы определить скорость звука с приемлемой погрешностью, необходима узконаправленная антенна. Ширина ХН имеющейся у нас параметрической антенны по уровню $0,7 - 3^\circ$. Такой пространственной избирательности недостаточно, поэтому было принято решение определять место прихода отраженных лучей на уровне $0,9$. Приемник перемещался в горизонтальной плоскости, при этом с помощью осциллографа контролировался уровень сигнала в приеме. Максимальный уровень сигнала соответствовал месту прихода акустического луча. Селекция лучей, отраженных от верхней и нижней границы проводилась по времени прихода сигналов на приемники. Время между приходами сигналов, отраженных от верхней и нижней границы слоя, определялось с помощью специализированного ПО, входящего в состав поставки АЦП Lcard E20-10.

Полученный набор данных можно использовать также и для определения скорости звука методом совмещенного излучателя и приемника. Время распространения рассеянных в обратном направлении сигналов будет совпадать с временем распространения зарегистрированных установкой отраженных сигналов. Измерив, время между приходами отраженных от границ слоя сигналов, расстояние между точками их прихода и угол наклона излучателя можно определить скорость звука по формулам (1) и (3).

Скорость звука, вычисленная по формуле 1 составила 2860 м/с. Погрешность определения скорости звука в слое составила 7%. Полученные

результаты подтверждают эффективность применения узконаправленной параметрической антенны при определении скорости звука с помощью метода лучевого параметра.

Скорость звука в слое определялась также и по формуле 3 при углах наклона антенны 0° и 17° . В результате описанной выше аппроксимации мы получили скорость звука равную 3150 м/с. Согласно рисунку 3, с ростом угла наклона излучателя растет методическая погрешность. Оценить характер методической погрешности можно путем моделирования процесса определения скорости звука при значении угла наклона излучателя 17° . Расчетное значение скорости звука в слое при заданных параметрах составило 3079 м/с. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования. Для определения скорости звука в слое с меньшей погрешностью нужно проводить измерения при меньшем угле наклона излучателя.

Разработанный метод позволяет проводить исследование параметров верхнего слоя морских осадков с помощью относительно простой приемоизлучающей акустической системы, причем излучатель и приемник расположены в одной точке. Для реализации предлагаемого метода необходимо излучить узконаправленный акустический сигнал с низким уровнем бокового поля. Сформировать требуемый сигнал можно с помощью параметрической излучающей антенны. Метод имеет ограничения, в связи с допущенным приближением при выводе уравнения (3). Результаты моделирования показали адекватность выражения (3) при излучении в диапазоне углов до 10° . Результаты экспериментальных исследований качественно подтвердили эффективность предлагаемого метода для углов наклона антенны 0° и 17° . Из вышесказанного можно сделать вывод об перспективности дальнейших исследований по возможной дистанционной классификации донных отложений с помощью метода совмещенного излучателя и приемника.

Литература

1. Морская сейсморазведка / Под редакцией А.Н.Телегина. - М.: ООО «Геоинформмарк», 2004. – 237 с.
2. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
3. 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.
4. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии. – М.:Физматлит. 2010 – 264 с.
5. Акустика морских осадков. Под ред. Л.Хэмптона. – М.: Мир, 1977. – 533 с.

References

- 1.Morskaja sejsmorazvedka. [Marine seismic]. Pod redakciej A.N.Telegina. M.: ООО «Geoinformmark», 2004. 237 p.
2. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Hidroakusticheskie parametricheskie sistemy[Parametric sonar system]. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2004. 400 p.
- 3.Voronin V.A., Kuznecov V.P., Mordvinov B.G., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nelinejnye i parametricheskie processy v akustike okeana [Non-linear and parametric processes in the ocean acoustics]. Rostov-na-Donu: Rostizdat, 2007. 448 p.
4. Kuznecov V.P. Nelinejnaja akustika v okeanologii. [Nonlinear acoustics in oceanography]. M.:Fizmatlit. 2010. 264 p.
5. Akustika morskih osadkov. [Acoustics marine sediments]. Pod red. L.Hjemptona. M.: Mir, 1977. 533 p.