УДК 551.462

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТОМОГРАФИИ МОРСКОГО ДНА ДЛЯ АКВАТОРИЙ, ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ. ПЕРВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В.А. Чупин, С.С. Будрин, Г.И. Долгих, С.Г. Долгих, А.А. Пивоваров, А.Н. Самченко, В.А. Швец, А.Н. Швырёв, С.В. Яковенко, И.О. Ярощук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН¹

Мобильный лазерный деформограф (МЛД), созданный в ТОИ ДВО РАН, широко используется в экспериментальных исследованиях структуры морского дна. Важный этап исследований связан с разработкой методики применения МЛД в покрытых льдом акваториях с перспективой создания основ томографии морского дна в шельфовых областях Арктики и Антарктики. Разрабатываемая методика ориентирована на решение задач геоакустической инверсии и построение реальной модели земной коры шельфовых областей. В проводимых экспериментальных исследованиях в качестве источника полезного сигнала используются низкочастотные гидроакустические излучатели различного типа, генерирующие сложные фазоманипулированные сигналы, и береговые стационарные и мобильные лазерные деформографы, регистрирующие сейсмические сигналы с характерными амплитудно-частотными свойствами. В результате эксперимента в условиях ледового покрытия акватории наблюдалась устойчивая регистрация приёмной системой всех излученных сигналов. Следующий этап работы предполагает математическую обработку полученной информации, необходимой для изучения времени приходов всех отраженных сигналов и сравнения их с данными контрольного оборудования излучающей системы.

введение

Хорошо известно, что низкочастотная гидроакустика является уникальным инструментом для дистанционного исследования не только различных неоднородностей в океане, но и для диагностики пород океанического дна. Дело в том, что когда низкочастотная волна распространяется в океане, часть ее энергии проникает в дно. Чем ниже частота сигнала, тем большая часть его энергии проникает в дно и тем глубже его проникновение в донные осадочные слои. Такое проникновение может достигать сотни метров, а при очень низких частотах излучаемых сигналов – до границы Мохоровичича. Благодаря этому характеристики такой волны зависят от параметров дна (плотности, поглощения и скорости звука в нем), а значит,

можно попытаться получить информацию о физических свойствах дна. Заметим, что при решении задач диагностики дна наравне с термином «низкочастотная акустика» отечественными исследователями часто используется также и термин «сейсмоакустика». Методы и подходы использования, обработки и моделирования низкочастотных сигналов в интересах диагностики структуры морского дна активно развиваются уже на протяжении более чем сорока лет. Результаты этих многочисленных исследований как в нашей стране, так и за рубежом позволяют рассматривать сейсмоакустику как самостоятельное и перспективное направление морской геофизики. Стоит отметить, что в нашей стране различные авторы решение таких проблем называют томографией дна океана, диагностикой дна океана,

сейсмоакустическими исследованиями, сейсмоакустическим профилированием и др. [1, 2]. За рубежом на протяжении уже многих лет является общепринятым термин «геоакустическая инверсия». Геоакустическая инверсия - это процесс оценивания параметров морского дна по результатам геоакустического моделирования, основанного на натурных измерениях и моделировании низкочастотных акустических сигналов [3]. Термин «геоакустическое моделирование» является классическим, он введен Е.Л. Гамильтоном еще в 1980 г., подразумевает процесс построения геоакустической модели. Геоакустическая модель - это «такая модель реального морского дна, в которой основное место занимают

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423) 231-14-00.

экспериментально измеренные, экстраполированные и предсказанные значения важных для гидроакустики параметров, а также геофизические характеристики, влияющие на распространение звука» [4]. Любая, даже самая простая задача геоакустической инверсии, является весьма непростой обратной задачей, относящейся к классу некорректных [5]. Стоит также учесть, что в реальных условиях как излучающие, так и приемные системы довольно часто могут испытывать случайные смещения. Например, приемная акустическая антенна (обычно это гибкий кабель-трос с гидрофонами, заякоренный или дрейфующий) отклоняется подводными течениями от требуемого положения. Условия проведения экспериментов также могут изменяться случайным образом и т.д. В этом случае некорректная задача дополнительно усложняется и становится еще и стохастической.

Регуляризация задач геоакустической инверсии достигается комплексно, за счет получения как можно большей дополнительной информации об условиях формирования звукового поля. Прежде всего - это качественное геоакустическое моделирование. Чем более адекватной и полной будет построенная геоакустическая модель, тем больше будет надежды на успех. К сожалению, решить эту проблему удается далеко не всегда. Полные данные могут отсутствовать по субъективным причинам, например, в нужном районе бедные геологические и геофизические исследования. Они могут быть объективно недостаточны в областях, где океаническое дно может испытывать значительную латеральную изменчивость, например, свал глубин на шельфе. В этих случаях мера незнания геоакустических свойств среды описывается вероятностным образом,

а задача решается на основе методов статистического оценивания (обычно – метод максимального правдоподобия) [6]. Следующим важным этапом решения задач геоакустической инверсии является использование в экспериментах источников звука и приемных систем, обладающих необходимыми свойствами и качествами. Следует использовать мощные излучатели в диапазоне относительно низких частот от десятка до сотен герц. Традиционными источниками звука для зондирования дна издавна были мощные импульсные источники звука. К таковым относятся пневмопушки, искровые разрядники и др., отличающиеся импульсной генерацией широкополосного сигнала. Наряду с целым рядом достоинств, таких как высокий уровень излучения и простота использования, импульсные источники обладают существенными недостатками.

Прежде всего - это невозможность обеспечения длительного накопления полезных сигналов из-за низкой стабильности импульсов, а также малая мощность сигнала в низкочастотной части спектра импульса. Альтернативный подход это использование когерентных сигналов [7]. Типичным режимом работы когерентных излучателей является линейная частотная модуляция излучаемого сигнала или сложные фазоманипулированные сигналы (так называемые М-последовательности). Принципиальным преимуществом использования когерентных источников в задачах геоакустической инверсии является возможность когерентного накопления сигналов с целью увеличения глубины зондирования или повышения разрешающей способности при умеренных или малых уровнях излучения [1, 2, 8, 9]. В зависимости от конкретных условий эксперимента возможны различные способы реализации подобного накопительного подхода. Например, формирование звукового поля нескольких фазированных источников, формирование пространственной приемной системы на базе одного или небольшого числа приемников. Излучение сигнала в виде последовательности модулированных импульсов специального вида и последующая согласованная их фильтрация обеспечивают эффективную корреляционную обработку принятого сигнала.

Заключительная и важная часть процедуры геоакустической инверсии, позволяющая регуляризовать обратную задачу, - это так называемые согласованные методы обработки акустических сигналов. В зарубежной литературе часто используется термин «matchedfieldprocessing» [10, 11]. Смысл подхода заключается в том, что для успешной процедуры обработки натурных данных и последующего обращения необходимо использовать аналитическую или численную модель звукового поля, наиболее полным образом учитывающую геоакустическую модель дна океана. Такая параметризованная модель звукового поля позволяет варьировать геоакустические параметры волновода и выбирать наиболее подходящие к результатам экспериментов [11]. В последние два десятка лет такой подход стал обязательным для проведения геоакустической инверсии.

Дальнейшее его развитие шло по пути включения статистических методов, таких как методы статистического оценивания и методы имитационного моделирования. Статистический подход позволил получать более надежные обращения и оценивать их достоверность в случаях неполных знаний о геоакустических свойствах среды, а также, когда условия эксперимента изменяются случайным образом [12–15]. Стоит отметить, что такие ситуации, как правило, и имеют место в реальных экспериментах [6, 13].

Методика эксперимента

До недавнего времени наиболее эффективной была следующая схема проведения экспериментальных исследований дна: 1) в качестве источника сейсмоакустических сигналов используются мощные низкочастотные гидроакустические излучатели; 2) низкочастотный гидроакустический излучатель генерирует сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности); 3) приём сейсмоакустических сигналов на дне осуществляется распределённой системой донных геофонов; 4) основным инструментом обработки полученной информации является свёртка излучённых сигналов с принятыми сигналами геофонов; 5) по времени задержки в цепи геофонов строят модель распространения сигналов от источника до приёмника; 6) на основании модели распространения сигналов строят модель верхнего слоя морской земной коры. Эта методика эксперимента сложна для применения на акваториях, покрытых льдом, так как необходимо массовое разрушение ледяного покрова не только для опускания на заданную глубину гидроакустического излучателя, но и, в основном, для постановки на дно распределённой системы геофонов.

В последние годы начаты работы по разработке другой методики, необходимой для изучения строения и структуры морского дна с построением реальной модели земной коры, основанной на использовании низкочастотных гидроакустических излучателей, генерирующих сложные фазоманипулированные сигналы, и береговых лазерных деформографов, обладающих уникальными амплитудно-частотными характеристиками [16, 17, 18]. Подобные комплексы приборов используются для исследований разных задач трансформации акустических колебаний на границе геосфер [19]. Полученные результаты по построению реальной модели земной коры изучаемого участка морского дна с определением основных упругих параметров позволяют надеяться на удачное применение данных методов для решения задач по изучению структуры и состава морской земной коры вплоть до границы Мохоровичича и построения реальной модели земной коры исследуемых регионов. В настоящей работе описан эксперимент по генерации подо льдом сложных фазоманипулированных сигналов низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой 33 Гц и приёму сейсмоакустических сигналов мобильным лазерным деформографом [20], расположенным на берегу, с демонстрацией некоторых полученных результатов.

Результаты эксперимента

Для проведения эксперимента был выбран Амурский залив Японского моря, большая поверх-

ность которого имеет устойчивый ледяной покров в зимний период. На рис. 1 приведена схема эксперимента. Расположение станции излучения выбиралось с учетом оптимальной глубины рабочего погружения излучателя, при которой наблюдается наибольший уровень излучения сигнала [21]. Станция излучения находилась в точке с координатами 43°12.391' с.ш. и 131°52.984' в.д. и обозначена на рисунке символом И. Глубина моря в месте излучения составляет 15,5 м. Мобильный лазерный деформограф находился на берегу в месте с координатами 43°11.754' с.ш. и 131°55.141' в.д. Расстояние между станциями излучения и приёма (лазерный деформограф) составило 3150 м.

Для излучения гармонических и сложных фазоманипулированных сигналов с центральной частотой 33 Гц использовалась гидроакустическая излучающая система с электромагнитным преобразователем, способная работать при глубинах погружения от 2 до 25 м. Максимальное эффективное звуковое давление, которое способна выдавать излучающая система, составляет 3500 Па (191 дБ/1 мкПа). Данное звуковое давление



Рис. 1. Схема проведения эксперимента. И – излучатель; ЛД – мобильный лазерный деформограф

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

создаётся излучающей системой при использовании максимального числа аккумуляторных батарей (шесть по 100 А/ч). В эксперименте излучатель запитывался от шести аккумуляторных батарей и погружался на глубину 12 м от поверхности льда. Толщина ледяного покрова в месте излучения составляла 0,45 м. Сигналы, создаваемые излучающей системой, записывались контрольным гидрофоном, который имеет чувствительность около 1 мВ/Па. Контрольный гидрофон помещался в 1 м от излучателя не на жёсткой, а на гибкой подвеске, что позволяло контролировать работу излучателя, но не позволяло точно определять уровень излучаемого сигнала. Полученные записи контрольного гидрофона использовались для дальнейшей обработки совместно с данными мобильного лазерного деформографа. На рис. 2 показано расположение элементов излучающей системы на поверхности льда. Гидроакустический излучатель опускался в прорубь с деревянной фермы. Аппаратура излучающей системы размещалась в автомобиле.

Для регистрации сейсмоакустического сигнала, созданного

в результате трансформации гидроакустического сигнала на границе «вода-дно», использовался мобильный лазерный деформограф [18], установленный на берегу на время проведения эксперимента. Оптическая часть мобильного лазерного деформографа выполнена по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, длина измерительного плеча которого составляла 6 м. Цифровая система регистрации, используемая в мобильном лазерном деформографе, позволяет измерять изменение расстояний между устоями лазерного деформографа с точностью 0,3 нм в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. При длине измерительного плеча 6 м чувствительность мобильного лазерного деформографа составит величи-Hy $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0.3 \mu M}{6M} = 5 \times 10^{-11}$. Cxema расположения приборов на бере-

говом посту показана на рис. 3. Оптическая часть мобильного лазерного деформографа расположена в термоизолированном помещении (1) с поддержанием постоянной температуры внутри. Путь луча между смонтированным на упругом основании и находящимся в термоизолированном укрытии отражателем (2) и интерференционным узлом расположен в световоде (3) из пенопропиленовых труб. Регистрация сигнала проводилась в отапливаемом лабораторном помещении (4).

Для проведения эксперимента была выбрана модель сигнала, состоящая из одного тонового сигнала длиной 300 с, паузой 30 с и одного фазоманипулированного участка излучения общей продолжительностью 485 с. Дополнительно после каждой серии излучения выполнялось излучение одного фазоманипулированного сигнала. На рис. 4 приведены динамические спектрограммы записей контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа при работе гидроакустической излучающей системы. Рис. 5 иллюстрирует результат математической свёртки записи сигнала контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа. По результатам предварительной обработки полученных данных установлено, что лазерным деформографом зарегистрированы все сигналы, излученные во время проведения эксперимента. Регистрируются



a

Рис. 2. Станция излучения: а – гидроакустический излучатель; б – аппаратура системы

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 3. Береговой пост: 1 – помещение с оптической скамьей мобильного лазерного деформографа; 2 – укрытие отражателя; 3 – световод; 4 – лабораторное помещение



Рис. 4. Динамические спектрограммы излучаемого сигнала: а – контрольного гидрофона; б – мобильного лазерного деформографа



Рис. 5. Результат свёртки М-последовательности с данными мобильного лазерного деформографа

максимумы прихода всех фазоманипулированных сигналов, излученных в ходе проведения эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена первая экспериментальная работа по излучению низкочастотного гидроакустического сигнала с морского ледового покрова и его регистрация береговым мобильным лазерным деформографом. В ходе предварительного анализа полученных экспериментальных данных установлено, что приёмной системой зарегистрированы все излученные акустические сигналы, обработка которых позволила получить хороший результат математической свёртки с данными контрольного гидрофона. Дальнейший анализ полученных результатов позволит разработать методику реконструкции геологических структур морского дна в акваториях, покрытых льдом, без его разрушения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-29-02023 офи_м, модернизация аппаратуры и проведение эксперимента).

ЛИТЕРАТУРА

1. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н. и др. Перспективные методы и технические средства сейсмоакустического зондирования шельфа и береговой зоны океана // Фундаментальные исследования океанов и морей. М.: Наука, 2006. Кн. 2. С. 491–511.

2. Авербах В.С., Боголюбов Б.Н., Заславский Ю.М. и др. Применение сложных фазоманипулированных сигналов для сеймоакустического зондирования грунта гидроакустическим источником // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 1. С. 5–12.

3. Tolstoy A. Volumetric (tomographic) three-dimensional geoacoustic inversion in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 124, N 5. P. 2793–2804.

4. Hamilton E.L. Geoacoustic modeling of sea floor // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 68, N 5. P. 1313–1340.

5. Акустика дна океана / под ред. У. Купермана и Ф. Енсена. М.: Мир, 1984. 454 с.

6. Yardim C., Gerstoft P., Hodgkiss W.S. Sequential geoacoustic inversion at the continental shelfbreak // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131, N 2. Pt. 2. P. 1722–1732.

7. Лебедев А.В., Малеханов А.И. Когерентная сейсмоакустика // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 7. С. 579–597.

8. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The Transarctic Acoustic Propagation Experiment and climate monitoring in the Arctic // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. V. 24, N 2. P. 183–201.

9. Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И. Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натурных условиях // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 4. С. 607–620.

10. Tolstoy A. Propagation model accuracy for MFP // J. of Comp. Acoustics. 2000. V. 8, N3. P. 389-399.

11. Tolstoy A. Matched Field Processing (MFP) – Based Inversion Method (SUB-RIGS) for Range-Dependent Scenarios // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. V. 24, N 2. P. 183–201.

12. Goh Y.H., Gerstoft P., Hodgkiss W.S. Statistical estimation of transmission loss from geoacoustic inversion using a towed array // J. Acoust. Soc. Am. 2007. V. 122, N 5. P. 2571–2579.

13. Yang J., Jackson D.R., Tang D. Mid-frequency geoacoustic inversion using bottom loss data from the Shallow Water 2006 Experiment // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131, N 2. Pt. 2. P. 1711–1721.

14. Dosso S.E., Nielsen P.L., Harison C.H. Bayesian inversion of reverberation and propagation data for geoacoustic and scattering parameters // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125, N 5. P. 2867–2880.

15. Dettmer J., Holland C.W., Dosso S.E. Analyzing lateral seabed variability with Bayesian inference of seabed reflection data // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125, N 1. P. 56–69.

16. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырёв А.Н., Ярощук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // Докл. Академии наук. 2013. Т. 452, № 3. С. 321–325.

17. Чупин В.А., Долгих Г.И. Развитие технологии диагностики морского дна с помощью низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 6. С. 90–95.

18. Долгих С.Г., Долгих Г.И., Чупин В.А., Яковенко С.В. Применение мобильного лазерного деформографа // Фотоника. 2016. № 6 (60). С. 82–87.

19. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Овчаренко В.В., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Технология пеленгации и идентификации опасных гидродинамических процессов Земли на стадии их зарождения и развития // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1 (3). С. 46–53.

20. Чупин В.А., Будрин С.С., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырёв А.Н., Ярощук И.О. Сезонная зависимость коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода-дно» // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 35–39.

21. Долгих Г.И., Ярощук И.О., Пивоваров А.А., Пенкин С.И., Швырёв А.Н. Низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая система // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 5. С. 163–164.

