

---

*The paper describes the laboratory setup, developed at the department of natural sciences and engineering disciplines Kyiv State Maritime Academy, which focuses on the scope of future careers of students, and can also be used for scientific research.*

УДК 551.463.2

*Лисютин В.А., Ластовенко О.Р.*

## АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЯ

*В статье рассматриваются некоторые акустические методы исследования водного слоя моря и слоистой структуры его дна. Анализируется применимость ряда томографических методов в условиях мелкого моря.*

**Ключевые слова:** *томография мелкого моря, нормальные волны, акустические поля, коэффициент отражения, групповая скорость*

В акустике океана можно выделить два основных направления: первое – изучение влияния свойств и динамики моря на распространение акустических сигналов – прямая задача, второе – использование акустических сигналов для исследования внутренней структуры вод моря и его дна – обратная задача. Для второго направления основным объектом исследования являются физические и акустические характеристики водного и донных слоев. Интересы океанологов в основном связаны с возможностями акустического мониторинга разномасштабных гидродинамических возмущений в море: вихрей, меандрирующих течений, внутренних волн, фронтальных зон, интересы инженеров – с возможностями восстановления акустических и физических параметров донных осадков. Решение обратных задач сводится к принципиальной возможности получать информацию о свойствах среды по характеру распространения, отражения и рассеяния акустических волн [1].

Законы распространения звука в море весьма сложны, и в первую очередь это относится к шельфовым районам мелкого моря. Скорость звука существенно меняется как по вертикали, вследствие изменения температуры и солености с глубиной, так и по горизонтали. Кроме того, на распространение звука оказывает влияние его рассеяние на неровных границах волновода [2].

Целью настоящей статьи является не столько критический (применительно к условиям мелкого моря) обзор существующих акустических методов исследования моря, объединяемых в настоящее время общим термином «томография», сколько попытка сформулировать принципиальные возможности и выработать перспективные идеи, основанные на волновом подходе к решению обратных задач акустики мелкого моря.

В 1979 году американские ученые В. Манк и К. Вунш предложили схему, предназначенную для реконструкции мезомасштабных неоднородностей поля скорости звука по измеренным временам прихода импульсного сигнала по различным лучевым траекториям. По аналогии с медицинской рентгеновской томографией, схема Манка была названа "акустическая томография океана" (АТО), основная задача которой – просветная диагностика крупномасштабных (десятки и сотни километров) неоднородностей океана на трассе между источниками и приемниками звука. Лучевая АТО в глубоком море позволяет дистанционно получать не только интегральные характеристики среды, но и параметры некоторых локальных неоднородностей, а также наблюдать эволюцию среды в течении времени проведения измерений. К настоящему времени с помощью АТО решаются задачи акустической термометрии, халинометрии, томографии течений [1,3].

Типовая схема применения АТО предполагает наличие нескольких источников и приемников звука. Рассмотрим основополагающие соотношения лучевой томографии поля скорости звука. Время распространения  $t_m$  акустического сигнала по лучу  $\Gamma_m$ , соединяющему какой-либо из источников звука с одним из приемников определяется соотношением

$$t_m = \int_{\Gamma_m} \frac{ds}{c(r, z)}, \quad (1)$$

где  $c(r, z)$  – скорость звука в среде,  $ds$  – элемент луча  $\Gamma_m$ . Представим  $c(r, z)$  в виде:  $c(r, z) = c_0(r, z) + \Delta c(r, z)$ , где  $c_0(r, z)$  – известное (опорное) состояние поля скорости звука (при  $\Delta c = 0$ ) и  $\Delta c(r, z)$  – подлежащее определению возмущение, обусловленное наличием неоднородностей в водной среде. В качестве  $c_0$ , исходя из возможностей расчета лучевых траекторий (вообще говоря, трехмерных) в неоднородной среде, могут быть выбраны различные распределения, например, усредненное по акватории в данное время года. Задача томографии сводится к тому, чтобы по набору  $t_m$  определить  $\Delta c$ . В точной постановке задача (1) оказывается весьма сложной, поскольку она нелинейна ( $\Delta c$  – в знаменателе), и путь интегрирования  $\Gamma_m$  зависит от  $\Delta c$ . Однако благодаря наличию малого параметра  $\varepsilon = |\Delta c/c_0|$ , правую часть уравнения (1) можно разложить в ряд по степеням  $\varepsilon$  и удержать только члены не выше первого порядка малости  $t_m = t_m^{(0)} + t_m^{(1)} + \dots$ , где  $t_m^{(0)} = \int_{\Gamma_m^{(0)}} \frac{ds}{c_0(r, z)}$  – время распространения сигнала в невозмущенной среде по лучу  $\Gamma_m^{(0)}$ . Линейная поправка к  $t_m$  дается выражением

$$t_m^{(1)} = - \int_{\Gamma_m^{(0)}} \frac{\Delta c ds}{c_0^2(r, z)}. \quad (2)$$

Именно это выражение было положено в основу томографического метода Манка. Уравнение (2) записывается для каждого из лучей, затем для его численного решения вся область томографии разбивается на ячейки, в пределах которых флуктуация  $\Delta c$  считается постоянной. Тогда (2) можно свести к системе алгебраических уравнений, которая может быть решена стандартными методами

$$t_m^{(1)} = \sum_{n=1}^N E_{mn} \Delta c_n,$$

где  $E_{mn} = 0$ , если  $m$ -й невозмущенный луч не прошел через  $n$ -ю ячейку и  $E_{mn} = \int_{\Gamma_m^{(0)}} c^{-2} ds$  – в противном случае [1].

Идея лучевой томографии течений заключается в регистрации разности времен распространения сигнала во встречных направлениях, линеаризованное уравнение может быть получено аналогичным (1) – (3) образом. Томография течений по сравнению с томографией поля скорости звука – значительно более сложная задача, поскольку скорости течений малы, и вариации времен прихода сигналов  $\Delta t_m^{(1)}(u)$ , возникающие за счет наличия течения оказываются значительно меньше, чем вариации  $t_m^{(1)}$  вследствие изменения скорости звука. Тем не менее, эксперименты показали, что томография течений и температуры в глубоком море работоспособны вплоть до расстояний в 1000 км [1,3].

Однако, линеаризация (1) оправдана не всегда. Первоначальные надежды на успешное применение лучевой АТО в мелком море быстро сменились разочарованием. Оказывается что даже при малых  $\varepsilon$  форма луча  $\Gamma_m^{(0)}$  может существенно отличаться от луча  $\Gamma_m$ . Это явление непредсказуемости трассы лучей при незначительных его угловых смещениях получило название «лучевого хаоса». В условиях лучевого хаоса никакая инверсия (восстановление) параметров невозможна. Второе принципиальное ограничение вызвано тем, что в мелком море времена распространения сигнала по отдельным лучам, испытавшим многократные

---

донно-поверхностные отражения, оказываются настолько близки, что лучи не могут быть разрешены ни при какой разумной ширине полосы частот источника сигнала. В мелком море лучевая АТО может использоваться только в придонных, с относительно стабильными гидрофизическими характеристиками слоев, либо в условиях существования сезонного приповерхностного звукового канала [1,4].

Альтернативой лучевой АТО для мелкого моря является маломодовая импульсная томография – МИТ [5-7]. Метод МИТ основан на регистрации эффекта трансформации модового состава низкочастотного акустического поля в мелководных каналах в результате изменения дисперсионных характеристик волновода. На законы дисперсии фазовой и групповой скорости мод кроме причин, вызывающих изменение времени пробега лучей, оказывает влияние также и слоистая структура дна и акустические характеристики морских осадков, однако времена пробега мод более стабильны. Техническая реализация МИТ в мелком море требует применения протяженных вертикальных приемных и передающих гидроакустических антенн трансиверов (приемопередатчиков), с помощью которых осуществляется встречное излучение и прием зондирующих импульсов с ограниченным модовым спектром. Вследствие различий в групповых скоростях отдельных мод (межмодовая дисперсия), начиная с определенной дистанции, вступления короткого импульса по различным модам могут быть разрешены. Препятствием для использования возможно более коротких импульсов является существование внутримодовой дисперсии, приводящее к уширению, «расплыванию» импульса с увеличением расстояния. Для повышения эффективности МИТ возможно использование нетональных импульсов, с законом изменения фазы, согласованным с законом дисперсии избранной моды. Такой импульс на определенном расстоянии от излучателя обостряется, испытывает максимальное сжатие во времени. Для моделирования влияния различных неоднородностей моря на временную реализацию отклика зондирующего сигнала требуется восстановление импульсной характеристики волновода при различных условиях. Здесь заключена еще одна трудность МИТ, поскольку, в отличие от лучевой теории, применение метода нормальных волн для горизонтально-неоднородных волноводов требует решения значительно более сложных уравнений (метод связанных мод) и накладывает строгие ограничения на степень неоднородности [7].

Рассмотренные выше лучевой и модовый методы томографии основаны на измерении вариаций времени задержки вступления импульсов по отдельным лучам или модам, что требует высокой точности определения расстояния между приемником и излучателем.

Для восстановления слоистой структуры дна в мелком море применяется метод согласованного поля (МСП) и метод, основанный на измерении резонансов коэффициента отражения [1]. МСП заключается в замене обратной задачи на многократно повторяемую гораздо более простую прямую задачу. С движущегося научно-исследовательского судна, оснащенного необходимой аппаратурой, измеряются горизонтальные и вертикальные «срезы» акустического поля, создаваемого одним или лучше несколькими удаленными источниками тональной частоты (лучше изменяющейся с течением времени по известному закону), расположенными на известной глубине. Рассчитывается пространственно-частотная интерференционная структура акустического поля для некоторой модели среды, являющейся начальным приближением. Расчеты поля затем многократно повторяются, а параметры модели уточняются, и усложняются до тех пор, пока не будет получено наилучшее согласование рассчитанного и экспериментально измеренного поля.

Для определения акустических (скорость звука, затухание) и физических (толщина слоя) характеристик дна МСП может применяться и в другом, «одномодовом» виде. Возбуждая в волноводе только первую нормальную волну на разных частотах и измеряя зависимость давления по глубине (вертикальный профиль моды) можно определить толщину осадочного слоя. Изменяя зависимость фазы колебания по глубине можно определить величину затухания в слое осадков. Дополнительную информацию можно извлечь, регистрируя, кроме давления, вертикальную и горизонтальную компоненты колебательной скорости [8,9].

Метод резонансов заключается в следующем. Если измерять модуль и фазу коэффициента отражения от дна с помощью направленной антенны для различных углов падения и различных частот, то на частотно-угловых зависимостях, вследствие интерференции волн, отраженных от границ раздела вода – первый слой осадков и первый – второй слой осадков наблюдаются осцилляции амплитуды и фазы. Методом последовательных приближений возможно подобрать такую структуру слоев, чтобы совпадение эксперимента и расчета было наилучшим. Для осуществления метода резонансов требуется применение возможно более остронаправленных антенн. Перспективным в этом плане представляется применение параметрических антенн, обладающих очень узкой характеристикой направленности [10,11].

Недавно, О.А. Годиным и др., для томографии течений в мелком море предложен подход, получивший название метода согласованной невзаимности – МСН (принцип акустической взаимности предполагает симметрию при перестановке источник-поле и поле-источник, понятно, что в среде с течением взаимность отсутствует). МСН опирается на достигнутый в последние годы прогресс в теории и математическом моделировании распространения звука в неоднородных движущихся средах, а также в использовании МСП для решения обратной задачи. Физической основой МСН является выбор в качестве измеряемой величины такой характеристики акустического поля, которая чувствительна к профилю течения, но нечувствительна к вариациям скорости звука и профиля дна. В силу этого, МСН приводит к устойчивому решению обратной задачи относительно вертикальной зависимости скорости течения [12].

В настоящее время, когда постановка эксперимента в море практически неосуществима, высказанные выше предложения о возможностях извлечения дополнительной информации о среде могут и должны быть проверены в ходе экспериментов математических путем компьютерного моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В.В. Акустическая томография океана / В.В. Гончаров, В.Ю. Зайцев, В.М. Куртепов и др. – ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1997. - 256 с.
2. Кацнельсон Б.Г. Акустика мелкого моря / Б.Г. Кацнельсон, В.Г.Петников - М.: - Наука, 1997.- 191с.
3. Вировлянский А.Л. Восстановление средней температуры океана по измерениям времени пробега звуковых импульсов / А.Л. Вировлянский, А.Ю. Казарова, Л.Я. Любавин // Акуст. журн., 2007, т. 53, № 2, С.216 - 225
4. Smith K.B. Ray chaos in underwater acoustics// K.B. Smith, M.G. Brown, F.D. Tappert // J. Acoust. Soc. Amer. – 1992. – Vol. 91. – № 5. – P. 1939 - 1949.
5. Лучинин А.Г. Низкочастотная акустическая томография мелкого моря с использованием маломодовых импульсов / А. Г.Лучинин, А. И. Хилько // Акуст. журн. – 2005. – Т. 51, №.2. – С. 228 – 242.
6. Хилько А.И. Маломодовая томография неоднородностей мелкого моря / А.И. Хилько, А.Г. Лучинин, В.Г. Бурдуковская, И.П. Смирнов // Акуст. журн. – 2007. – Т. 53, №.3. – С. 437 – 450.
7. Матвеев А.Л. Сравнительный анализ томографических методов наблюдения неоднородностей в условиях мелкого моря / А.Л. Матвеев, Д.А. Орлов, А.А. Родионов, Б.М. Салин, В. И. Торчин // Акуст. журн. – 2005. – Т. 51, №.2. – С. 268 – 280.
8. Гончаренко Б.И. О волновых числах и разности фаз между компонентами звукового поля в трехслойном волноводе / Б.И. Гончаренко, Л.Н. Захаров, В.Е. Иванов // Акуст. журн., 1979, Т. XXV, Вып. 4, С. 507 – 514.
9. Акуличев В.А. Векторно-фазовые методы в акустической томографии океана / В.А. Акуличев, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко и др.//ДАН. – 2006. – Т. 406, №2. – С. 61 – 64.
10. Абросимов Д.И. Особенности пространственной интерференционной структуры акустического поля в мелком море / Д.И. Абросимов, Ю.В. Петухов // Акуст. журн. – 2000. – Т. 46, №1. – С. 5 – 12.
11. Кузнецов В.П. Нелинейная акустика в океанологии / В.П. Кузнецов – М.: Физматлит, 2010. – 264 с.

- 
12. Бреховских Л.М. Акустика неоднородных сред / Л.М. Бреховских, О.А. Годин //Т.1: Основы теории отражения и распространения звука. - 2007. – 442 с., Т.2: Звуковые поля в слоистых и трехмерно-неоднородных средах. - 2009. - 425 с.

**Лісютін В.О., Ластовенко О.Р.**

#### **АКУСТИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРЯ**

*У статті розглядаються деякі акустичні методи дослідження водного шару моря і шаруватой структури його дна. Аналізується застосовність ряду методів томографії в умовах мілкого моря.*

**Ключові слова:** *томографія мілкого моря, нормальні хвилі, акустичні поля, коефіцієнт відбиття, групова швидкість*

**V.Lisiyтин, O.Lastovenko**

#### **ACOUSTIC METHODS OF RESEARCH OF SEA**

*Some acoustic methods of research of water layer of sea and stratified structure of his bottom are examined in the article. Applicability of row of tomography methods is analysed in the conditions of shallow sea.*

**Keywords:** *tomography of shallow sea, normal modes, acoustic fields, reflectivity, group speed*

УДК 004.9

**Давыдов В.С., Тарасюк В.И., Кучерук С.М., Блоха Д.А.**

### **О СОЗДАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВНОГО КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ СУДОВОЖДЕНИЯ**

*В статье представлен анализ использования на кафедре судовождения и управления судом Киевской государственной академии водного транспорта имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного системы компьютеризированного контроля качества теоретической подготовки студентов 2-4 образовательно-квалификационных уровней. На базе созданных системы контроля и 3-х электронных учебников по базовым дисциплинам подготовки бакалавров и магистров судовождения, со встроенной системой тестового самоконтроля знаний, создан информационно-методический компьютеризованный комплекс средств контроля качества подготовки специалистов судовождения.*

*Использование в академии в учебном процессе разработанного комплекса позволило достичь объективной и достоверной оценки качества теоретической подготовки студентов по всем специальным дисциплинам на протяжении всего срока обучения в академии, уменьшить финансовые и временные затраты на проведение контроля, в целом повысить уровень знаний студентов специальности «судовождение».*

Украина, несмотря на сложности длительного периода реформирования высшего образования сумела, сохранив всё лучшее в подготовке моряков от старой школы, вывести морское образование на первые места в мире. Об этом свидетельствует востребованность моряков с украинскими дипломами в международном торговом мореплавании. По данным независимых организаций (Балтийский и международный морской совет, Международная федерация судовладельцев) Украина занимает 1-е место в мире по количеству морских офицерских кадров уровня управления (капитаны, старшие помощники, старшие механики) и 5-е место