

АКУСТИКА ОКЕАНА

Доклады
XVI^{ой} школы-семинара
им. акад. Л.М.Бреховских

OCEAN ACOUSTICS

Proceedings of the
XVIth L.M. Brekhovskikh's conference

ГЕОС

Российская Академия Наук
Институт Океанологии им. П.П. Ширшова
Акустический Институт им. акад. Н.Н. Андреева

АКУСТИКА ОКЕАНА

*Доклады XVI школы-семинара
им. акад. Л.М. Бреховских,
совмещенной с XXXI сессией
Российского Акустического Общества*



OCEAN ACOUSTICS

*Proceedings of the
16th L.M. Brekhovskikh's conference*

Москва
ГЕОС
2018

УДК 551.463

А 44

ББК 26.323

**Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М.Бреховских
"Акустика океана", совмещенной с XXXI сессией**

Российского Акустического Общества.

М.: ГЕОС, 2018, 436 с.

ISBN 978 5-89118-768-9

В книге собраны доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М.Бреховских "Акустика океана", совмещенной с XXXI сессией Российского Акустического Общества. Школа-семинар проходила в Институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН 29 мая- 1 июня 2018 года.

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Книга издана при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-20023.

Редактирование: Гончаров В.В., Цыплакова Т.И.

Работа выполнена в рамках
государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010)
при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-05-20023).

Издается с 1982 г.

This book contains the proceedings of the XVIth Brekhovskikh's Conference "Ocean Acoustics".

This conference was held at the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, from 29 May to 1 June 2018, jointly with the XXXI session of the Russian Acoustical Society.

All papers were published in the authors' versions.

The book was published under financial support from grant RFBR № 18-05-20023.

А 44

ББК 26.323

ISBN 978 5-89118-768-8 © РАН, 201

УДК 551.463.21: 534

О.С. Красулин, А.С. Шуруп

**ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОМОГРАФИИ
ОКЕАНА С УЧЕТОМ НЕАДИАБАТИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДОВЫХ СИГНАЛОВ**

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119992 ГСП-2 Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2
Тел. (495) 939-3081, e-mail: shurup@physics.msu.ru

Рассматривается решение задачи неадиабатической модовой томографии океана на основе функционально-аналитического алгоритма Новикова-Сантацесариа. Обсуждаемый подход не требует ни линеаризации модели и построения матриц возмущений, ни итераций и привлечения дополнительных процедур регуляризации, что делает перспективным исследование его возможностей в задачах акустической томографии. Алгоритм основан на использовании достаточно строгих интегральных уравнений, позволяющих пересчитать данные рассеяния, измеренные на границе области томографирования, в оценки характеристик среды с учетом эффектов неадиабатического распространения модовых сигналов. Приводятся результаты численного моделирования.

Акустическая томография океана [1] позволяет получить информацию о пространственных распределениях различных характеристик акваторий с размерами в десятки, сотни и даже тысячи километров, что делает этот подход незаменимым при проведении океанографических исследований на региональном уровне, а также в рамках глобального мониторинга состояния Мирового океана. С математической точки зрения, томография океана является частным случаем более обширного класса обратных задач рассеяния (ОЗР). По-видимому, наибольшего прогресса в решении ОЗР, удалось достичь в квантовой механике, где были предложены математически строгие, так называемые функционально-аналитические алгоритмы (см. работу [2] и ссылки в ней). В виду того, что уравнение Шредингера в изознергетическом случае с точностью до обозначений совпадает с уравнением Гельмгольца, исследование возможностей этих алгоритмов в акустических задачах также представляется перспективным. Достаточно подробный список публикаций, посвященных исследованию возможностей функционально-аналитических методов в задачах акустической томографии, можно найти в [3]. Впервые возможность применения этих методов в задачах модовой томографии океана рассматривалась в [4], где предполагалось, что выполнено адиабатическое приближение. В настоящей работе рассматривается модель неадиабатической томографии океана.

тической модовой томографии, основанная на математических результатах работы [2].

Предполагается, что исследуемая акватория окружена по периметру вертикальными антеннами, излучающими и принимающими поля мод заданных номеров. Для простоты предполагается, что влиянием течений можно пренебречь и условия распространения в акватории определяются только неизвестным распределением скорости звука $c(\mathbf{r})$, где $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$ – пространственный радиус-вектор в системе координат с началом на поверхности акватории и осью Oz , направленной вертикально вниз. На фиксированной циклической частоте ω акустическое поле $p(\mathbf{r})$ внутри рассматриваемой акватории удовлетворяет уравнению Гельмгольца:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}) + k_0^2 p(\mathbf{r}) = v(\mathbf{r}, \omega) p(\mathbf{r})$$

где функция рассеивателя $v(\mathbf{r}, \omega) = \omega^2 \left(\frac{1}{c_0^2} - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \right)$ описывает возмущение скорости звука $c(\mathbf{r})$ относительно известного фонового значения c_0 ; $k_0 = \omega/c_0$. Представление поля в океаническом волноводе в виде суммы мод $p(\mathbf{r}) = \sum_m \varphi_m(x, y) \psi_m(z)$ (здесь $\varphi_m(x, y)$ – поле m -ой моды в горизонтальной плоскости (x, y) , $\psi_m(z)$ – профиль m -ой моды) приводит к системе уравнений [5]:

$$\nabla_{x,y}^2 \varphi_m(x, y) + k_{0m}^2 \varphi_m(x, y) = \left[\int_0^H \psi_m(z) v(\mathbf{r}, \omega) \psi_n(z) dz \right] \varphi_n(x, y)$$

которое, в свою очередь, может быть переписано в виде

$$\nabla_{x,y}^2 \varphi_m(x, y) + k_{0m}^2 \varphi_m(x, y) = V_{mn}(x, y, \omega) \varphi_n(x, y) \quad (1)$$

где матричный оператор

$$V_{mn}(x, y, \omega) = \left[k_0^2 - k_{0m}^2 \right] \delta_{mn} + \int_0^H \psi_m(z) v(\mathbf{r}, \omega) \psi_n(z) dz \quad (2)$$

описывает взаимодействие мод, вызванное присутствием неоднородности $v(\mathbf{r}, \omega)$; k_{0m} – горизонтальное волновое число m -ой моды в фоновом волноводе глубины H ; δ_{mn} – символ Кронекера. Полученные уравнения (1), (2) с точностью до обозначений совпадают с уравнениями (1.4), (1.5) из [2], где предложен алгоритм нахождения V_{mn} по данным рассеяния в виде так называемого оператора Дирихле-Неймана \hat{F}_{mn} , переводящего поля $\varphi_n|_{\mathcal{Y}}$, измеренные на границе \mathcal{Y} области томографирования в нормальные производные (внешние по отношению к границе) этих полей: $\partial \varphi_m / \partial v|_{\mathcal{Y}} = \hat{F}_{mn}(\varphi_n|_{\mathcal{Y}})$. В итоге, решение задачи восстановления неизвестного распределения скорости звука $c(\mathbf{r})$ на основе полей мод $\varphi_m(x, y)$, измеренных на границе иссле-

двумерной акватории, можно условно разбить на несколько этапов. На первом этапе находятся элементы оператора $\hat{F}_{mn} - \hat{F}_{0mn}$, где оператор \hat{F}_{0mn} определяется аналогично \hat{F}_{mn} , но для полей в отсутствие рассеивателя. Далее, $\hat{F}_{mn} - \hat{F}_{0mn}$ используется для определения значения классической амплитуды рассеяния, что позволяет на следующем этапе восстановить неоднородность в виде V_{mn} . На последнем этапе функция рассеивателя $v(\mathbf{r}, \omega)$, а вместе с ней и искомая скорость $c(\mathbf{r})$ находится из (2) на основе восстановленных значений V_{mn} . Удобство проводимого рассмотрения состоит в том, что все упомянутые этапы восстановления, за исключением последнего, совпадают с точностью до обозначений с уже численно реализованным и исследованным в [3] алгоритмом реконструкции двумерных неоднородностей. Главное отличие заключается в том, что теперь рассматриваются блочные матрицы. Так, например, на первом шаге в двумерном случае [3] рассчитывается оператор $\hat{F} - \hat{F}_0$, матрица которого имеет размерность $Z \times Z$, где Z – количество приемопередатчиков преобразователей (антенн) на границе акватории. В рассматриваемом же случае матрица оператора $\hat{F}_{mn} - \hat{F}_{0mn}$ состоит из блоков, каждый из которых имеет размерность $Z \times Z$, а количество таких блоков определяется количеством излучаемых m -ых и принимаемых n -ых мод; недиагональные блоки характеризуют взаимодействие модовых сигналов. При этом все основные интегральные соотношения двумерного алгоритма [3] остаются прежними. Следует также отметить, что обобщение рассматриваемого трехмерного алгоритма восстановления на случай учета океанических течений возможно, но не тривиально.

При численном моделировании рассматривался изоскоростной волновод с абсолютно жестким дном, со скоростью звука в водном слое $c_0=1500$ м/с, глубины $H_0=3\lambda$, где λ – длина волны. Используемые параметры модели носят сугубо иллюстративный характер. Неоднородность представляла собой возмущение рельефа Гауссовой формы $H(x,y)$, смещенное из центра области томографирования. В такой упрощенной постановке задачи значения k_{0m}^2 и $\psi_m(z)$, рассчитываются аналитически, что полезно при проверке работоспособности модели. В качестве примера, на рис. 1а изображена истинная функция $V_{11}(x,y)$, а на рис. 1б – результаты ее восстановления $\hat{V}_{11}(x,y)$. Как видно на рис. 1б, амплитуда, характерные пространственные размеры, а также расположение $V_{11}(x,y)$ восстановлены с высокой точностью. Использование оценок $\hat{V}_{mn}(x,y)$, полученных для всех распространяющихся мод, позволяет восстановить функцию $v(\mathbf{r}, \omega)$ из (2), которая в рассматриваемой модели дает оценку рельефа $\hat{H}(x,y)$.

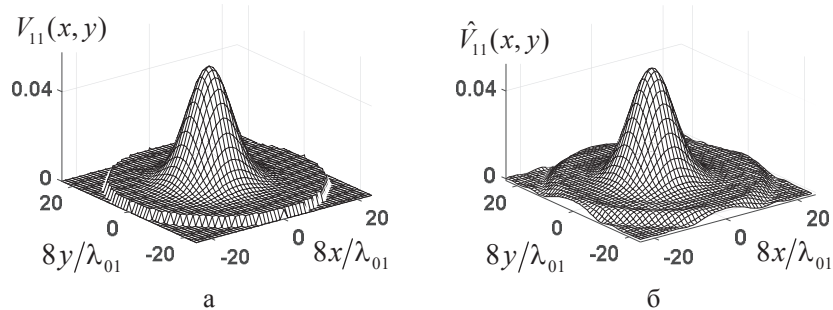


Рис. 1. Истинное распределение по акватории неоднородности в виде V_{11} (а) и результата восстановления \hat{V}_{11} (б), полученного с помощью функционального алгоритма Новикова-Сантацесариа.

Предложенная в работе численная модель позволяет получить самые первые результаты восстановления характеристик океанического волновода с учетом неадиабатического взаимодействия мод. Это открывает перспективы дальнейшего более детального исследования возможностей функционально-аналитического алгоритма Новикова-Сантацесариа в задачах акустической томографии океана. В первую очередь, стоит вопрос о помехоустойчивости получаемых оценок характеристик среды, а также о реализуемости такого подхода при конечном и весьма ограниченном количестве источников и приемников в гидроакустическом эксперименте.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №16-29-02097офи_м, №16-02-00680.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В.В., Зайцев В.Ю., Куртепов В.М., Нечаев А.Г., Хилько А.И. Акустическая томография океана. Н. Новгород: ИПФРАН, 1997. 255 с.
2. Novikov R.G., Santacesaria M. Monochromatic reconstruction algorithms for two-dimensional multi-channel inverse problems // International Mathematics Research Notices, 2013, v.2013, №6, p.1205-1229.
3. Буров В.А., Шуруп А.С., Зотов Д.И., Румянцева О.Д. Моделирование функционального решения задачи акустической томографии по данным от квазиточечных преобразователей// Акуст. ж., 2013, т.59, №3, с.391-407.
4. Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S., Rumyantseva O.D. Application-offunctional-analyticalNovikovalgorithmforthepurposesofoceantomography // Proc. of 11thEuropeanConferenceonUnderwaterAcoustics. Edinburgh, 2012, p.317-322.
5. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука. 2007. 369 с.