

Развитие методов и алгоритмов решения обратных акустических задач рассеяния

К.В. Дмитриев,* Д.И. Зотов, О.Д. Румянцева, С.Н. Сергеев, А.С. Шуруп
 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Представлены результаты экспериментальных исследований характера распространения акустических сигналов в мелком водоеме, в том числе, при наличии ледовой поверхности. Приводятся результаты восстановления параметров волновода и оценки модовой структуры акустического поля по данным эксперимента в шельфовой зоне. С помощью численного моделирования исследованы возможности функционального алгоритма, который предназначается для целей томографии акустических рассеивателей, представленных рефракционно-поглощающими неоднородностями и, одновременно, векторным полем течений.

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.60.Pt, 43.35.Wa

УДК: 551.463.21, 534.2, 517.4, 517.9

Ключевые слова: обратные задачи, акустическая томография, мелкое море, модовый подход, функциональный алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматриваются подходы к решению многомерных обратных задач рассеяния в природных средах, направленных, в конечном счете, на исследование шельфовой зоны арктических морей. Акцент делается на экспериментальном исследовании распространения звука в мелком водоеме, а также на восстановлении параметров шельфовой зоны по данным натурного эксперимента при условии минимальных требований на осуществление такого эксперимента. В работе [1] была предпринята попытка восстановить параметры мелкого моря по данным, полученным двумя одиночными приемниками в пассивной схеме, с использованием лучевого подхода. В модовом подходе, рассматриваемом в представляемой работе, возникает дополнительная задача восстановления характеристик распространяющихся мод, по которым предполагается восстановление параметров среды.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ В МЕЛКОМ ВОДОЕМЕ

Распространение звука изучалось в ряде экспериментов, проведенных в озере «Карьер Сима» в Подмосковье [2, 3]. Озеро находится в природном заказнике биостанции МГУ, в его районе отсутствуют антропогенные шумы. Глубина водоема примерно 1 м, что делает его волноводом с частотой отсечки порядка 700 Гц. Такие частоты легко излучить и модулировать по частоте в широкой полосе; предполагается, что изучаемые характеристики поля на таких «низких» частотах будут аналогичны характеристикам полей в шельфовой зоне мелких морей, где пришлось бы излучать существенно более низкие частоты с сопутствующими техническими трудностями.

*E-mail: burov@phys.msu.ru

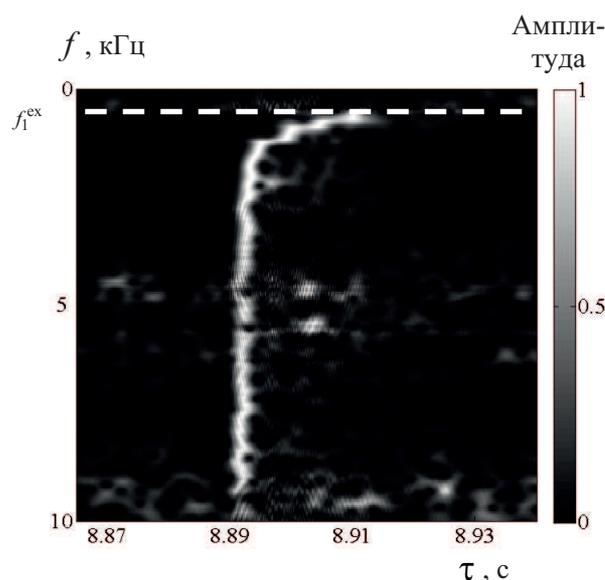


Рис. 1: Спектрограмма импульсной функции отклика водоема на расстоянии 33 м от источника, нормированная на максимум в каждой частотной полосе. Хорошо видна частота отсечки $f_1^{ex} \approx 700$ Гц и временной сдвиг, вызванный дисперсией

Первый эксперимент состоял в излучении ЛЧМ сигналов и их регистрации одиночным гидрофоном, расположенным в центре водного слоя на разных расстояниях от источника. Последующая корреляционная обработка позволяет определять импульсную функцию отклика водоема. При ее анализе получены следующие основные результаты. Во-первых, с помощью спектрального анализа удалось явно наблюдать дисперсию (рис. 1) и определить свойства дна (акустически мягкое). Дисперсия в мелком водоеме на низких частотах играет существенную роль для последующего решения обратной задачи, так как она позволяет выделять сиг-

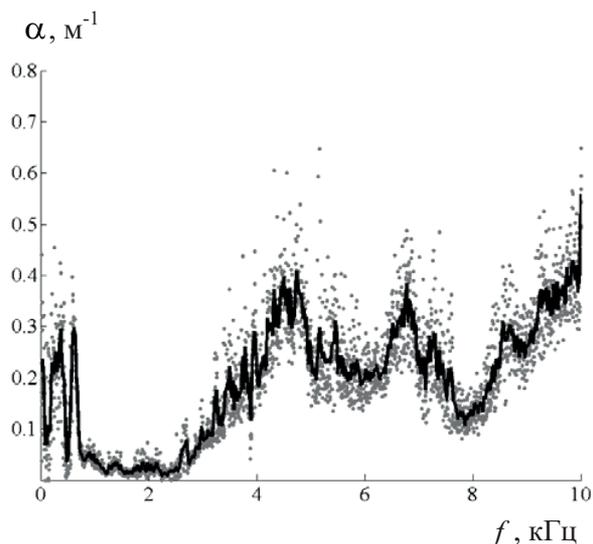


Рис. 2: Зависимость модового коэффициента затухания α от частоты f . Точками обозначены значения, соответствующие шести наблюдениям на каждой частоте; сплошная линия соответствует усреднению по наблюдениям

налы отдельных мод, используемые для последующего восстановления параметров исследуемой акватории по данным с одиночных гидрофонов. В глубоком море для этих целей используются вертикальные линейные антенны.

Во-вторых, измерения, проведенные на различных расстояниях от источника, позволили определить частотную зависимость модового коэффициента затухания (рис. 2). Сигнал сильно затухает на частотах ниже критической частоты водоема 700 Гц. С наименьшими потерями распространяется сигнал в диапазоне 700–2000 Гц, а сигнал на частотах 4.5–6.5 кГц и выше 8.5 кГц сильно зашумлен. В-третьих, по результатам наблюдения сигнала, отраженного от берегов водоема, удалось оценить скорость звука в грунте (рис. 3). В диапазоне частот 800–2000 Гц, соответствующих минимальному затуханию, получено значение $c = 1045 \pm 185$ м/с.

Во втором эксперименте изучалось распространение звука в мелком водоеме при наличии ледовой поверхности. Одновременно использовались четыре антенны, расположенные на разных расстояниях от источника. Запись велась синхронно, что позволило определить скорость распространения сигнала. В результате было выявлено наличие трех типов волн, распространяющихся в водоеме с существенно разными скоростями: волна со скоростью 1410 м/с (что близко к значению скорости звука в пресной воде при температуре около 0°C); придонная волна, распространяющаяся со скоростью 2770 м/с; «медленная» волна, распространяющаяся со скоростью 870 м/с.

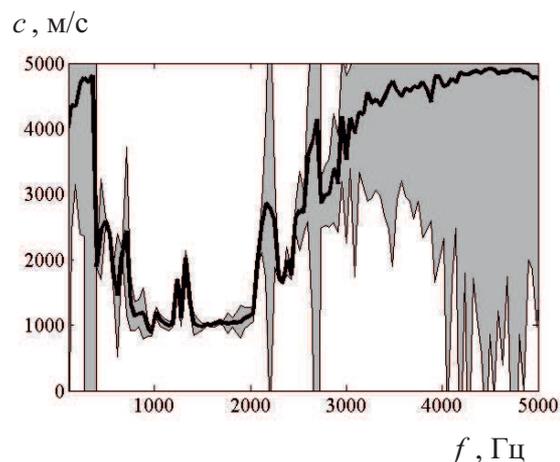


Рис. 3: Скорость звука в грунте: Черная линия — величина скорости, серая область — оценка погрешности

Проведенные эксперименты позволили сделать однозначный вывод о том, что в мелком водоеме за счет дисперсионных свойств можно выделить сигналы, соответствующие отдельным модам; по характеристикам распространения этих модовых сигналов далее можно, решая обратную задачу, оценить значения параметров водоема.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ МЕЛКОГО МОРЯ

Восстановление модовой структуры проводилось по данным эксперимента во Флоридском проливе в пассивной схеме двумя придонными гидрофонами. Рассматривалась спектрограмма $K_{sp}(c', f)$ взаимной функции корреляции зарегистрированных шумовых полей, где c' — оценка скорости распространения сигнала между точками приема, f — частота. Расстояние между гидрофонами составляло 5.01 км, глубина моря — примерно 100 м. На рис. 4 изображены фрагмент нормированного модуля взаимной функции корреляции шумов и дисперсионные кривые, рассчитанные для сложного профиля скорости звука в водном слое (измеренном независимо). Полагалось, что скорость звука в дне равна 1780 м/с (рис. 4, пунктирные линии) и 1710 м/с (рис. 4, сплошные тонкие линии), а отношение плотностей в дне и воде 1.8 для обоих случаев. Применение методов частотно-временной фильтрации сигналов [4], с привлечением так называемого «оператора деформации» («warping operator» в англоязычной

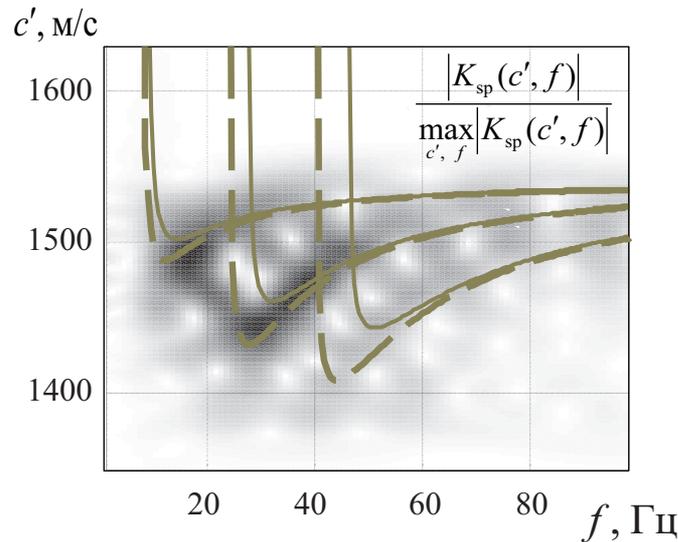


Рис. 4: Нормированный модуль спектрограммы $|K_{sp}(c', f)|$ взаимной функции корреляции шумового поля, зарегистрированного во Флоридском проливе; дисперсионные кривые рассчитаны для модельного волновода со скоростью звука в дне 1780 м/с (пунктир) и 1710 м/с (сплошные тонкие линии)

литературе), позволило выделить первые три моды рассматриваемого волновода. Полученные результаты могут использоваться при построении схем пассивной модовой томографии мелкого моря по данным с одиночных донных гидрофонов, а также в других обратных задачах, при решении которых используются сигналы отдельных мод.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ АКУСТИЧЕСКИХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

С помощью численного моделирования исследованы возможности функционального алгоритма [5–7] для целей томографии акустических неоднородностей, описываемых скалярными и векторными функциональными параметрами. На примере совместного восстановления неоднородностей скорости звука, коэффициента поглощения и вектора скорости течений проиллюстрированы достоинства рассматриваемого алгоритма — строгость решения, отсутствие итераций, приемлемая помехоустойчивость — при восстановлении рассеивателей как средней силы, так и сильных. Для повышения помехоустойчивости томографической процедуры предложена и численно реализована многочастотная оценка восстанавливаемых параметров среды.

На рис. 5 приведены результаты восстановления скорости звука $c(\mathbf{r})$, амплитудного коэффициента поглощения $\alpha(\mathbf{r}, \omega)$ и вектора скорости течений $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ (при постоянном невозмущенном значении плотности среды) в виде скалярной

$$\nu(\mathbf{r}, \omega_j) = \omega_j^2 \left(\frac{1}{c_0^2} - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \right) - 2i \omega_j \frac{\alpha(\mathbf{r}, \omega_j)}{c(\mathbf{r})}$$

и векторной $\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega_j) = \frac{\omega_j}{c^2(\mathbf{r})} \mathbf{v}(\mathbf{r})$ составляющих рассеивателя; здесь \mathbf{r} — радиус-вектор; ω_j — циклическая частота с номером j ; c_0 и $k_{0j} = \omega_j/c_0$ — скорость звука и волновое число в фоновой непоглощающей среде. Важно, что восстановление всех упомянутых составляющих комбинированного скалярно-векторного рассеивателя осуществляется в единой схеме, без дополнительного разделения влияния этих составляющих на данные рассеяния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные новые предпосылки и подходы к решению обратных задач рассеяния открывают новые возможности мониторинга природных сред. Так, использование одиночных гидрофонов в пассивной схеме позволяет отказаться от низкочастотных излучателей и систем приемных антенн. Ставшие актуальными задачи изучения шельфовых зон порождают вопросы изучения (в первую очередь, экспериментальным путем) характера распространения звука в мелкой воде в сложных условиях, в том числе, при наличии ледовой поверхности. В то же время, применение функционального подхода позволяет получить достаточно строгое решение обратной задачи для оценки скалярно-векторных характеристик природных сред без применения итераций и без привлечения дополнительных процедур регуляризации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-29-02097 офи_м).

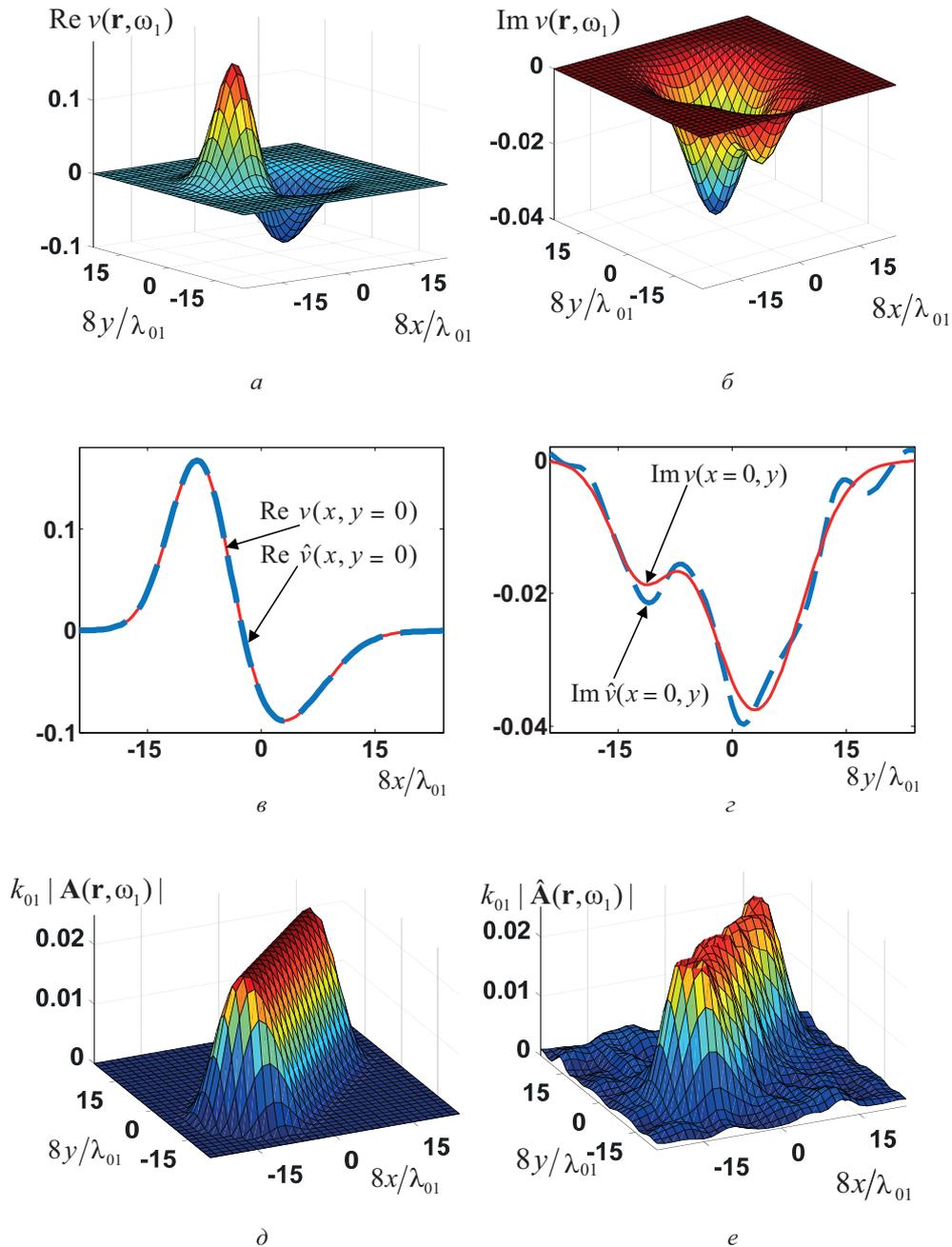


Рис. 5: Результат восстановления функциональным способом скалярной (рефракционно–поглощающей) составляющей ν и векторной составляющей \mathbf{A} акустического рассеивателя по зашумленным данным на 41 частоте (λ_{01} — длина волны в фоновой среде на частоте ω_1): общий вид функции истинного рассеивателя $\text{Re } \nu$, ответственной за рефракцию, (а) и функции $\text{Im } \nu$, ответственной за поглощение, (б); центральные сечения действительной (в) и мнимой (г) частей функции истинного рассеивателя ν (красная линия) и восстановленного рассеивателя $\hat{\nu}$ (пунктирная синяя линия); пространственное распределение модуля истинного векторного поля $\mathbf{A}(\mathbf{r}, \omega_1)$ (д) и восстановленного $\hat{\mathbf{A}}(\mathbf{r}, \omega_1)$ (е)

[1] Гончаров В. В., Шуруп А. С., Годин О. А., Заботин Н. А., Веденеев А. И., Сергеев С. Н., Brown M. G., Шатравин А. В. Акуст. журн. 2016. **62**, № 4. С. 431.
[2] Дмитриев К. В., Дорофеева А. А., Панков И. А., Сергеев

С. Н. Изв. РАН. Сер. Физ. 2015. **79**, № 12. С. 1704.
[3] Дмитриев К. В., Липавский А. С., Панков И. А., Сергеев С. Н., Фадеев Е. А. Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. **81**, № 1. С. 81.

- [4] *Сергеев С. Н., Шуруп А. С., Годин О. А., Веденев А. И., Гончаров В. В., Муханов П. Ю., Заботин Н. А., Brown M. G.* Акуст. журн. 2017. **63**, № 1. С. 73.
- [5] *Agaltsov A. D., Novikov R. G.* J. Math. Phys. 2014. **55**, N 10. P. 103502.
- [6] *Agaltsov A. D.* Eurasian J. of Mathematical and Computer Applications. 2016. **4**, N 1. P. 4.
- [7] *Зотов Д. И., Шуруп А. С., Румянцева О. Д.* Изв. РАН. Сер. Физ. 2017. **81**, № 1. С. 111.

Developing the methods and algorithms for solution of inverse acoustical scattering problems

K. V. Dmitriev, D. I. Zotov, O. D. Rumyantseva, S. N. Sergeev, A. S. Shurup

¹*Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia E-mail: burov@phys.msu.ru*

The results of experimental studies of the nature of the propagation of acoustic signals in shallow water are presented, including the case of an ice layer presence. The results of the reconstructing the waveguide parameters and estimating the mode structure of the acoustic field by experimental data in the shelf zone are presented. The possibilities of functional algorithm that is intended for the purposes of tomography of acoustic scatterers represented by refractive-absorbing inhomogeneities and, simultaneously, by a vector field of currents are numerically investigated.

PACS: 43.30.+m , 43.60.+d , 43.60.Pt , 43.35.Wa

Keywords: inverse problems, acoustical tomography, shallow sea, mode approach, functional algorithm.

Received 29 June 2017.

Сведения об авторах

1. Дмитриев Константин Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: burov@phys.msu.ru.
 2. Зотов Дмитрий Игоревич — канд. технич. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81.
 3. Румянцева Ольга Дмитриевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-81.
 4. Сергеев Сергей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-30-81.
 5. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-30-81.
-